

Jarno Vatanen

IC Stripline -testimetodin käyttöönotto: Stripline-kammion vertailevat testit

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

8.5.2018

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Jarno Vatanen IC Stripline -testimetodin käyttöönotto: Stripline-kammion vertailevat testit 37 sivua + 11 liitettä 8.5.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Elektroniikka
Ohjaajat	HW Design Engineer Lauri Suotula Yliopettaja Matti Fischer
<p>Insinööri työ tehtiin Murata Electronics Oy:n EMC laboratorion toimeksiantona. Työn tarkoitus oli selvittää, soveltuuko uusi IC Stripline -kammio testimetodina komponenttien validointiin kuten nykyisin käytössä oleva TEM-kammio.</p> <p>Työssä perehdyttiin tarvittaviin standardeihin ja sähkömagneettisen yhteensopivuuden teorian kirjallisuuteen. Lisäksi tietoa ja apua mittauksiin saatiin EMC-laboratorion insinööreiltä.</p> <p>Työssä mitattiin kolmea eri anturia kummallakin kammiolla. Anturit mitattiin monella eri asetuksella ja orientaatiolla. Kammioita analysoitiin myös mittaamalla niiden VSWR-arvot, joka kertoo niiden impedanssisovituksen ominaisuudet.</p> <p>Työn tuloksena mittauksissa ei havaittu merkittäviä eroja antureiden ulostulossa kammioiden välillä. Testattavissa piirilevyissä todettiin eroavaisuuksia standardin suosituksiin verrattuna. Tuotteiden emissioiden mittauksessa löydettiin ohjelmistossa virhe. Tämä korjattiin ja nyt ohjelmisto mittaa oikein korkeammillakin taajuuksilla.</p>	
Avainsanat	IC Stripline, TEM, EMC

Author Title Number of Pages Date	Jarno Vatanen Deployment of IC Stripline test method: Stripline cell comparative measurements 37 pages + 11 appendices 8 May 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electronics
Instructors	Lauri Suotula, HW Design Engineer Matti Fischer, Senior Teacher
<p>The thesis work was commissioned by Murata Electronics Oy's EMC laboratory. The purpose of this work was to find out if new IC Stripline cell test method is fitted for component validation in the same way as currently used TEM cell.</p> <p>Required standards and electromagnetic compatibility theory were used as source material. In addition, information and assistance for the measurements were obtained from EMC laboratory's engineers.</p> <p>Three different sensors were measured in both cells. The sensors were measured by a variety of settings and orientation. The cells were also analyzed by performing VSWR characteristic measurements which present how accurate impedance level is in each test cell.</p> <p>There were no significant differences measured in the sensors output between the cells. The test PCBs had some differences compared to the standards recommendations. During the work there was an error discovered in the emission measurement software. Error was corrected and now the software measures correctly also at the higher frequencies.</p>	
Keywords	IC Stripline, TEM, EMC

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähkömagneettinen yhteensopivuus	2
2.1	Häiriölähteet	3
	Luonnolliset häiriöt	4
	Keinotekoiset häiriöt	5
2.2	Häiriöiden kytkeytyminen	6
2.2.1	Galvaaninen kytkeytyminen	7
2.2.2	Kapasitiivinen kytkeytyminen	9
2.2.3	Induktiivinen kytkeytyminen	11
2.2.4	Säteilemällä tapahtuva kytkeytyminen	12
3	EMC-mittaukset	14
3.1	Mittalaitteet	14
3.2	Piirilevy	15
3.3	Kammiot	18
	TEM-kammio	21
	IC Stripline -kammio	22
4	Immuneettitesti	26
4.1	Tulokset	29
5	Emissiotesti	31
5.1	Tulokset	34
6	Yhteenveto	36
	Lähteet	37

Liitteet

Liite 1. Kuva testilevystä

Liite 2. Testattava tuote 1 immuneettimittauksien tulokset 0° TEM vs. 0° IC Stripline

Liite 3. Testattava tuote 1 immuneettimittauksien tulokset 90° TEM vs. 90° IC Stripline

Liite 4. Testattava tuote 1 immuneettimittauksien tulokset 0° IC Stripline vs. 90° IC Stripline

Liite 5. Testattava tuote 1 immuneettimittauksien tulokset 0° TEM vs. 90° TEM

Liite 6. Testattava tuote 1 immuniteettimittaustulokset 0° IC Stripline vs. 180° IC Stripline

Liite 7. Testattava tuote 1 immuniteettimittaustulokset 0° TEM vs. 180° TEM

Liite 8. Testattava tuote 1 immuniteettimittaustulokset 90° IC Stripline vs. 270° IC Stripline

Liite 9. Testattava tuote 1 immuniteettimittaustulokset 90° TEM vs. 270° TEM

Liite 10. Testattava tuote 2 emissiomittaustulokset TEM

Liite 11. Testattava tuote 2 emissiomittaustulokset IC Stripline

Lyhenteet

DUT	Device Under Test, testattava tuote.
ENIG	Electroless nickel immersion gold, nikkeli-immersiokultapinnoite.
EM	Electromagnetic, sähkömagneettinen.
EMC	Electromagnetic Compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus.
EMI	Electromagnetic Interference, sähkömagneettinen häiriö.
EMP	Electromagnetic pulse, sähkömagneettinen pulssi.
ESD	Electrostatic Discharge, staattisen sähkön purkaus.
IC stripline	TEM waveguide, avoin tai suljettu testikammio.
IEC	International Electrotechnical Commission, kansainvälinen standardikomitea.
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems, mikroelektromekaaninen.
MSA	Measurement System Analysis, mittaussysteemin analyysi.
RF	Radio Frequency, radiotaajuus.
RFI	Radio Frequency Interference, radiotaajuinen häiriö.
SMD	Surface Mount Device, pintaliitoskomponentti.
SPI	Serial Peripheral Interface bus, sarjamuotoinen oheislaiteväylä.
TEM	Transverse Electromagnetic Mode, sähkömagneettisen kentän etenismuoto.
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio, seisovan aallon suhde (SAS).

1 Johdanto

Murata Manufacturing Company on maailman johtava keraamipohjaisten elektroniikka-komponenttien valmistaja, joka työllistää yli 54 000 henkilöä maailmanlaajuisesti. Akira Murata perusti yrityksen vuonna 1944. Yritys on edelleen suvun omistuksessa ja nykyinen toimitusjohtaja on Tsuneo Murata.

Suomen tehdas, Murata Electronics Oy (MFI), valmistaa mm. piimikroelektromekaanisia (MEMS) kiihtyvyyss-, kallistus- ja gyroskooppiantureita. Sovellusalueita ovat autoteollisuus, terveysteknologia ja teollisuuden eri sovellukset. Suurin osa liikevaihdosta tulee edelleen autoteollisuudesta, vaikka MFI on pyrkinyt laajentamaan asiakaskuntaansa teollisuuden eri aloille.

MFI oli aikaisemmin VTI Technologies Oy, jonka Murata osti tammikuussa 2012 täydentääkseen omaa tuoteportfoliotaan MEMS-tuotteilla. VTI perustettiin alunperin yhdessä Vaisalan, United Technologiesin ja SITRAN toimesta vuonna 1991, Vaisalassa kehitetty kiihtyvyyssanturi ydintuotteenaan. Breed Technologies osti VTI:n vuonna 1995.

Tässä työssä tutkitaan uutta kalustoa MFI:n sisäisen EMC -laboratorion käyttöön. Laboratorioon hankittiin uusi IC Stripline -kammio immunitaetti- ja emissiomittauksia varten. Työn tavoite on tutkia kammion soveltuvuus MFI:n komponenttien testaukseen ja vertailla sitä nykyisin käytössä olevaan mittausmetodiin, jossa käytetään TEM-kammiota.

Osana työtä valmistettiin testilevyt, joilla tehtiin vertailevat testit metodien välillä. Tarkoituksena oli tehdä "Golden sample" -testilevyt, joilla voi myöhemmin tehdä testijärjestelmien ja mittaussysteemien analyysyjä (MSA-testejä).

2 Sähkömagneettinen yhteensopivuus

Sähkömagneettiset ilmiöt syntyvät sähkövarauksista ja niiden vuorovaikutuksista toisiinsa. Yksinkertaisesti voidaan sanoa, että sähkökenttä syntyy paikallaan olevista varauksista, magneettikenttä liikkuvista varauksista ja sähkömagneettinen säteily syntyy kiihtyvässä liikkeessä olevista varauksista. Toisistaan etäällä olevien varausten vuorovaikutus on käytännössä lähes olematon ja siten merkityksetön. [3, s. 17.]

Sähkömagneettinen häiriösäteily (EMI) on vakava ja kasvava päästöongelma, jota laitteet joutuvat sietämään. EMI-säteily saattaa aiheuttaa käyttövikoja sähkölaitteissa, häiriötä radiotaajuuksilla, pahimmassa tapauksessa sytyttää herkästi palavaa ainetta tai vaikuttaa negatiivisesti suoraan kudokseen. [7, s. 11.]

Sähkölaitteelta vaaditaan turvallisuutta, luotettavuutta sekä toimintaa muiden laitteiden kanssa. Sähkömagneettinen yhteensopivuus eli EMC takaa samassa toimintaympäristössä olevien laitteiden toiminnan. EMC koostuu häiriöiden lähettämisestä sekä kyvystä sietää muiden laitteiden lähettämää häiriötä. EMC kannalta hyvä laite ei kohtuuttomasti häiritse muita ja toimii luotettavasti muiden laitteiden alaisessa häiriössä. [3, s. 15.]

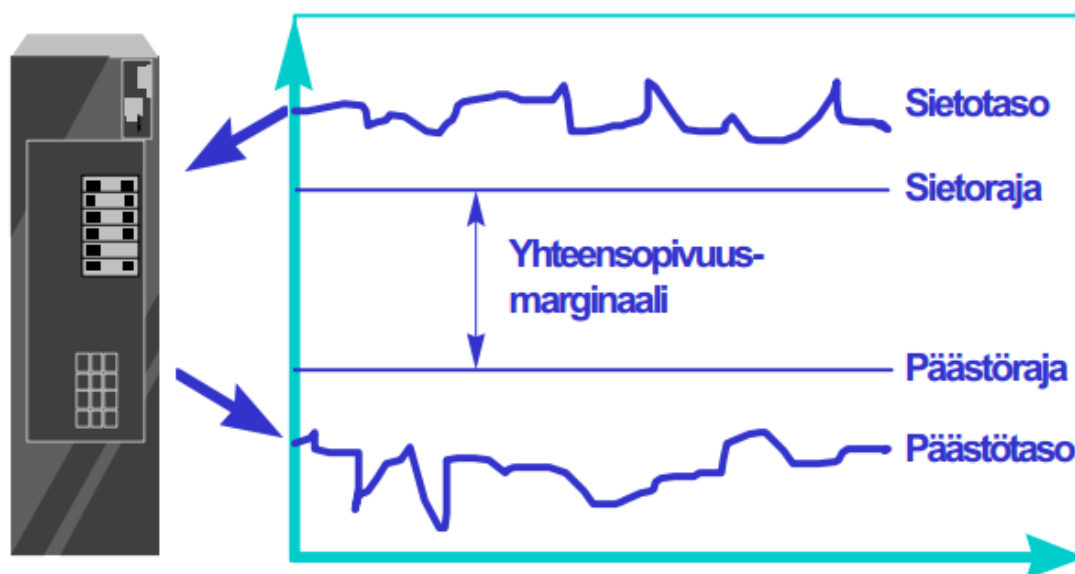
Standardi IEC61000 määrittelee sähkömagneettisen yhteensopivuuden seuraavasti "Laitteen tai järjestelmän kyky toimia tyydyttävästi sähkömagneettisessa ympäristössä aiheuttamatta kohtuuttomia sähkömagneettisia häiriöitä millekään muulle samassa ympäristössä olevalle.". [3, s.15.]

Sähkömagneettista häiriötä on kaikkialla ympäristössä, mutta sen tasot vaihtelevat eri paikoissa. Termillä sähkömagneettinen ympäristö tarkoitetaan ympäristöä, missä tietyt laitteet on tarkoitettu toimiviksi. Sähkömagneettinen ympäristö koostuu sekä säteilevistä että johtuvista häiriöistä. [3, s. 15.]

Jotta laitteet toimisivat häiriöttä keskenään, ne pitää suunnitella niille tarkoitettuun sähkömagneettiseen ympäristöön. Esimerkiksi teollisuusympäristöön suunnitellun laitteen tulee toimia eri vaatimuksien mukaan kuin kotitalousympäristöön suunnitellun laitteen. Kussakin käyttöympäristössä kaikki laitteet saadaan yhteensopiviksi, kun huolehditaan, että mikään laite ei päästä sovittua suurempaa häiriötä ja että kaikki laitteet sietävät sovittun tasoiset häiriöt. Laitteen aiheuttamaksi häiriöpäästöksi luetaan kaikki sähkö-

magneettiset ilmiöt, joita ei ole tarkoitettu hyötykäyttöön. Häiriöt leviävät ympäristöön joko johtumalla tai säteilemällä. [3, s. 16.]

EMC-standardeissa yhteensopivuuden perusteena on yhteensopivuusmarginaali. Tällä tarkoitetaan päästö- ja sietorajojen välistä marginaalia taajuuden suhteen (kuva 1). Kun ympäristön kaikki laitteet sietävät standardissa määritellyt häiriöt, eikä yksikään laite aiheuta standardissa määriteltyä suurempaa häiriötä, vallitsee siinä ympäristössä sähkömagneettinen yhteensopivuus. [3, s. 16.]

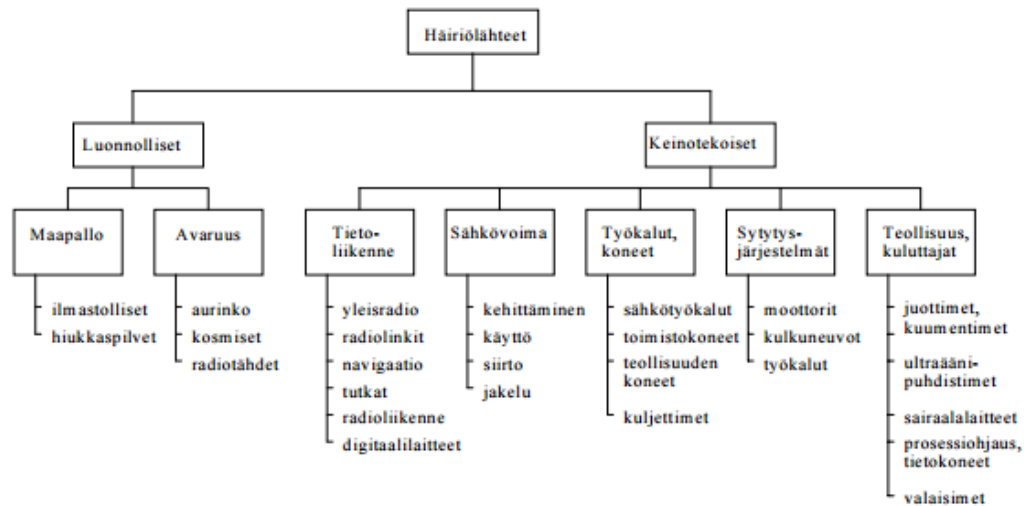


Kuva 1. Havainnollistava kuva yhteensopivuusmarginaalista [3, s. 16].

Laitteen kykyä sietää sähkömagneettista säteilyä kutsutaan myös laitteen immunitetiksi ja laitteen sähkömagneettista päästöä kutsutaan laitteen emissioksi.

2.1 Häiriölähteet

Sähkömagneettiset häiriöt voidaan lajitella kahteen ryhmään, luonnollisiin häiriöihin ja keinotekoisiiin häiriöihin. Lisäksi taustakohinaa voi pitää omana kategorianaan tai sisällyttää se luonnollisiin häiriöihin. Kuvasta 2 nähdään miten häiriölähteitä voi jaotella eri kategorioihin. [3, s. 17; 6, s. 4.]



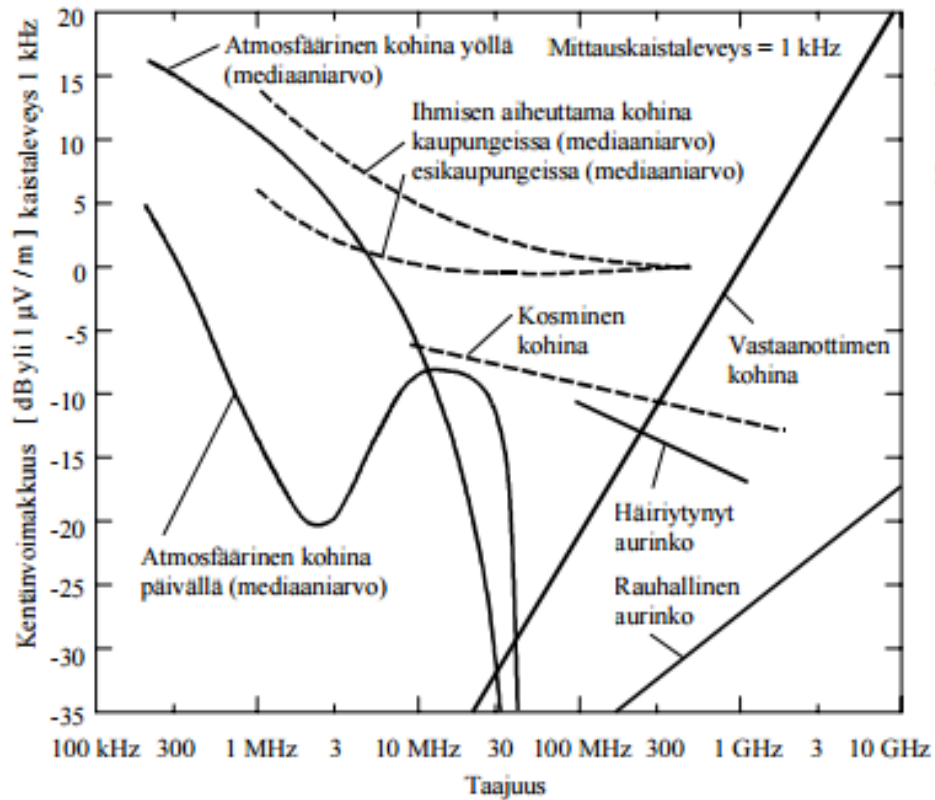
Kuva 2. Erilaisten sähköisten häiriölähteiden jaottelu perusteita [6, s. 4].

Luonnollisiin häiriöihin kuuluu kaikki luonnossa syntyvä häiriö, esimerkiksi ukkonen tai kosminen säteily. Keinotekoisiiin häiriöihin taas luokitellaan kaikki ihmisen tekemät laitteet, esimerkiksi matkapuhelimet, sähkömoottorit tai loistevalaisimet. Itse häiriöt voidaan lajitella monella eri tapaa. [3, s. 17; 6, s. 4.]

Luonnolliset häiriöt

Ukkonen on luonnon häiriölähteistä tunnetuin ja merkittävin. Ukkospilveen ja maanpinnan välille syntyy jopa 1 – 10 kV/m suuruinen sähkökenttä. Kun salama iskee, niin pilven varaus purkautuu. Tämä nopeasti muuttuva sähkökenttä interferoi sähkölaitteiden johtuvien osien kanssa. Salamaniskun suuri sähkövirtaus saa aikaan myös voimakkaan sähkö- ja magneettikentän. Tämäkin saattaa vaurioittaa sähkölaitteita. Sähkölaitteet voivat myös vaurioitua salaman iskiessä suoraan sähköverkkoon ja näin synnyttää suuren ylijännitteen ja syöksyaallon. [3, s. 17–18.]

Toinen merkittävä luonnossa esiintyvä häiriö on kosminen säteily. Sähkölaitteille haitallisimpia ovat atmosfäärinen kohina ja aurinkomyrskyt. Aurinkomyrskyt aiheuttavat ongelmia varsinkin radiolaitteille ja satelliiteille. Kuvasta 3 nähdään eri häiriöiden voimakkuuksia ja taajuusalueita. [3, s. 18; 6, s. 11.]



Kuva 3. Säteilemällä tapahtuvien häiriökenttien voimakkuuksia [6, s. 11].

Kuvasta 3 poiketen, ihmisen aiheuttama kohina on kasvanut vuodesta 1999 jolloin kuvan lähde on kirjoitettu. Nykyään matkapuhelinverkot toimivat korkeammilla taajuuksilla ja langattomien verkkojen tukiasemat ovat yleistyneet.

Keinotekoiset häiriöt

Keinotekoiset häiriöt voidaan jaotella kahteen ryhmään: tahattomasti ja tietoisesti synnytettyihin. Tahattomasti synnytettyjen häiriölähteiden ei ole tarkoitus säteillä sähkömagneettista energiaa ympäristöönsä. Tällaisia häiriölähteitä ovat esimerkiksi loisteputket, sähkömoottorit ja suurivirtaiset teollisuuslaitteet. Radioliikenne on hyvä esimerkki tietoisesti synnytetystä häiriölähteestä. [3, s. 18.]

Ihmisen aiheuttama staattisen sähköön purkaus eli ESD (electrostatic discharge) on useimmiten haitallinen sähkölaitteille. Varsinkin kuivissa olosuhteissa materiaalien hankaaminen keskenään aiheuttaa materiaalien välille suuren jännite-eron. Ihmiseen voi varautua jopa yli 20 kV:n jännite riippuen olosuhteista. Kun varautunut ihminen kos-

kettaa laitteen johtavaa osaa, voi tämä varaus purkautua hallitsemattomasti laitteeseen. Tämä purkaus saattaa vaurioittaa laitetta heti tai siihen voi syntyä piilovika, joka ilmenee vasta myöhemmin. Myös hetkelliset vikatilat ovat mahdollisia ESD:n sattuessa. ESD on varsin iso ongelma varsinkin elektroniikkateollisuudessa. [3, s. 18; 6, s. 5.]

Tietoisesti synnytyt häiriölähteet perustuvat siihen, että ne säteilevät sähkömagneettista energiaa ympäristöönsä. Tällaisia ovat esimerkiksi tutkat, matkapuhelimet, satelliitit ja langattomat tietoliikenneyhteydet. Näiden laitteiden kuuluu toimintaperiaatteensa mukaisesti säteillä sähkömagneettista energiaa ympäristöönsä. Tämä on yleisesti hyvin kapeakaistaista ja voimakasta säteilyä. Esimerkiksi langaton tukiasema saattaa säteillä hyötysignaalia 2,5 GHz:n taajuudella. Tällaisten sähkölaitteiden ei ole tarkoitus kuitenkaan tahallisesti häiritä muita laitteita ympäristössään. [3, s. 18.]

Sähkömagneettinen pulssi eli EMP (electromagnetic pulse) tarkoittaa voimakkaan sähkömagneettisen energian sisältämää lyhytkestoista pulssia, joka voi syntyä esimerkiksi ydinpommin räjähdysyhteydessä. EMP aiheuttaa hyvin voimakkaan magneettikentän, jonka suuruus voi olla 1–8 kA/m ja sähkökentän suuruudeltaan 50–150 kV/m. Tämän pulssin nousuaika on 20–100 ns. Riippuen pommin koosta ja räjähdyskorkeudesta EMP voi vaurioittaa suojaamattomat sähkölaitteet hyvinkin laajalta alueelta. [3, s. 18; 6, s. 5.]

2.2 Häiriöiden kytkeytyminen

Sähkömagneettisilla häiriöillä on neljä eri kytkeytymismekanismia. Nämä ovat

- galvaaninen kytkeytyminen
- kapasitiivinen kytkeytyminen
- induktiivinen kytkeytyminen
- säteilemällä tapahtuva kytkeytyminen.



Kuva 4. Häiriöketju [3, s. 21].

Kuten kuvasta 4 nähdään, jotta häiriöketju toteutuisi niin tarvitaan kolme eri elementtiä. Ensiksi, pitää olla häiriölähde. Toiseksi, pitää olla jokin sähkölaite eli häiriönvastaanotin. Kolmanneksi, tarvitaan kytkeytymistapa, joka välittää häiriön häiriölähteestä sähkölaitteelle. Lisäksi häiriösignaalin ominaisuuksien täytyy olla sopivat. 1. Sähkölaitteen pitää olla herkkä häiriön taajuudelle. 2. Häiriön amplitudin, tai voimakkuuden, pitää olla tarpeeksi suuri häiritäkseen sähkölaitetta. 3. Viimeiseksi häiriön pitää tapahtua semmoisella ajanhetkellä, jolloin häiriön vastaanotin on altis häiriölle. [5, s. 30.]

On kolme eri tapaa katkaista kuvan häiriöketju:

- Häiriösignaalin ominaisuuksia häiriölähteessä voi muuttaa siten, että se ei vaikuta häiriön vastaanottimeen.
- Häiriön vastaanotin voidaan suojata häiriösignaalilta.
- Häiriösignaalin kytkeytymistapa voidaan minimoida tai kokonaan eliminoida.

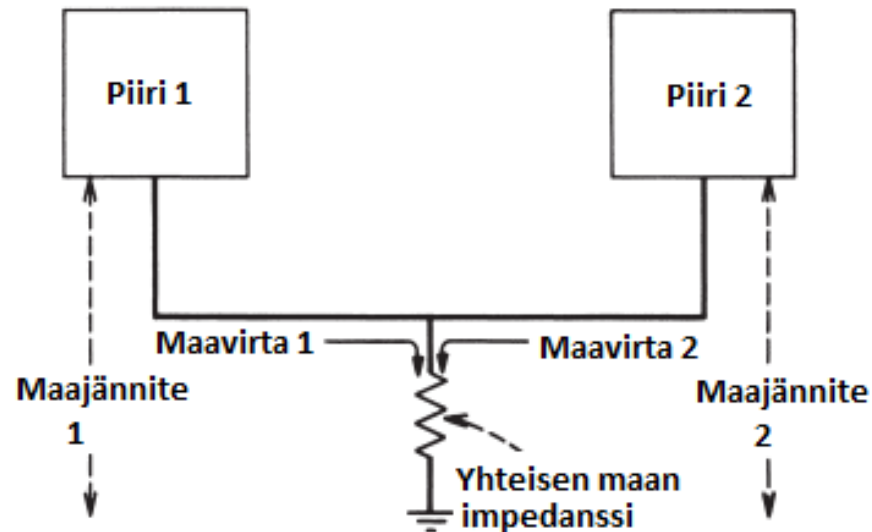
Joissain tapauksissa häiriön vaimennustekniikoita täytyy soveltaa kahdessa tai kaikissa kolmessa kohtaa häiriöketjua. Häiriölähteen ominaisuuksia, taajuutta, amplitudia tai aikaa, jos kyse on emissio-ongelma. Immuneiteetti-ongelman tapauksessa, voidaan parantaa häiriön vastaanottimen suojausta. Monissa tapauksissa häiriölähteen tai häiriön vastaanottimen muokkaaminen on epäkäytännöllistä. Joten jäljelle jää kytkeytymistavan muokkaaminen [5, s. 31.]

2.2.1 Galvaaninen kytkeytyminen

Galvaaninen kytkeytyminen voidaan jakaa kahteen: johtumalla kytkeytymiseen sekä yhteisen impedanssin kautta kytkeytymiseen [3, s. 31].

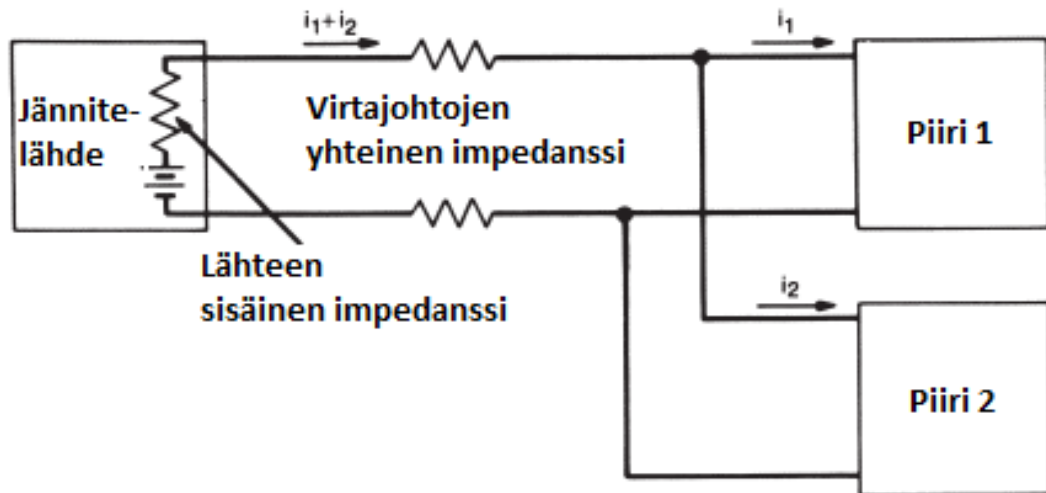
Kytkeytymistavoista johtumalla kytkeytyminen on suoraviivaisin. Suurin osa tällaisista häiriöistä syntyy virtalähteissä. Virtalähde on usein toteutettu hakkuriteholähteenä. Kun hakkuriteholähde muuntaa verkkojännitteen sopivaksi elektroniikalle, teholähde kehittää nopeita transienttipiikkejä. Nämä piikit johtuvat muunnetun jännitteen mukana elektroniikkaan. Tässä tapauksessa häiriönlähde on virtalähde, kytkeytymistapa on johtumalla kytkeytyminen ja häiriön vastaanotin on jännitteellinen elektroniikka. [3, s. 21; 5, s. 31–32.]

Kun kaksi laitetta on kiinnitetty samaan jännitelähteeseen ja runkojen ollessa maadoitettuna eri maadoituspisteisiin, niin runkojen välille syntyy potentiaaliero. Yhdistettävässä laitteen signaalijohdolla, joka on maadoitettu molemmista päistä runkoon, syntyy laitteiden välille yhteinen impedanssi. Potentiaalierosta syntyneelle häiriövirralle on tällöin kulkureitti laitteesta toiseen yhteisen jännitelähteen maadoitusjohtimen kautta ja takaisin signaalijohdinta pitkin. Tämä piiri on esitetty kuvassa 5. [3, s. 22; 5, s. 32.]



Kuva 5. Kun kaksi piiriä jakaa yhteisen maan, niin toisen piirin maavirta vaikuttaa toisen piirin maajännitteeseen [5, s. 32].

Toinen esimerkki yhteisen impedanssin kautta syntyneeseen häiriövirtaan nähdään piiristä kuvassa 6. Mikä tahansa muutos piirin 2 virranotossa muuttaa jännitettä, jota piiri 1 näkee sisäänkytötyssään. Tämä johtuu virtajohtojen yhteisestä impedanssista sekä jännitelähteen sisäisestä impedanssista. Parannus tähän piiriin saadaan, kun piirin 2 virtajohdot kytketään suoraan jännitelähteeseen. Silti kytkentään syntyy häiriötä jännitelähteen sisäisestä impedanssista johtuen, jonka piirit 1 ja 2 vielä jakavat keskenään. [5, s. 32–33.]



Kuva 6. Kun kaksi piiriä jakaa jännitelähteen, niin toisen piirin virrankulutus vaikuttaa toisen piirin jännitteeseen. [5, s. 33].

Galvaanista kytkeytymistä voidaan vaimentaa esimerkiksi valitsemalla pienen kytkentäimpedanssin omaavat signaalikaapelit tai lisäämällä tehonsyöttöön verkkosuodatin. Yleinen tapa lisätä suodatusta on asentaa ferriittirengas virtajohtoon, joka vaimentaa piikkejä sähkönsyötössä. [3, s. 22.]

2.2.2 Kapasitiivinen kytkeytyminen

Kaapeliin ympärille syntyy sähkökenttä virran kulkiessa kaapelissa. Kappaleiden, kuten esimerkiksi kaapelien, välille muodostuu aina parasiittinen kapasitanssi, jolloin suurtaajuiset häiriöt saattavat siirtyä kapasitiivisesti esim. kaapelista toiseen. Kaapeleiden keskinäiskapasitanssiin voidaan vaikuttaa esim. kasvattamalla kaapeleiden välimatkaa, jolloin kapasitanssi pienenee ja häiriön kytkeminen voidaan mahdollisesti ehkäistä. Kaapelin kapasitanssi voidaan laskea kaavalla (1). [3, s. 22–23.]

$$C_M = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1)$$

C_M on johtojen välinen keskinäiskapasitanssi [F]

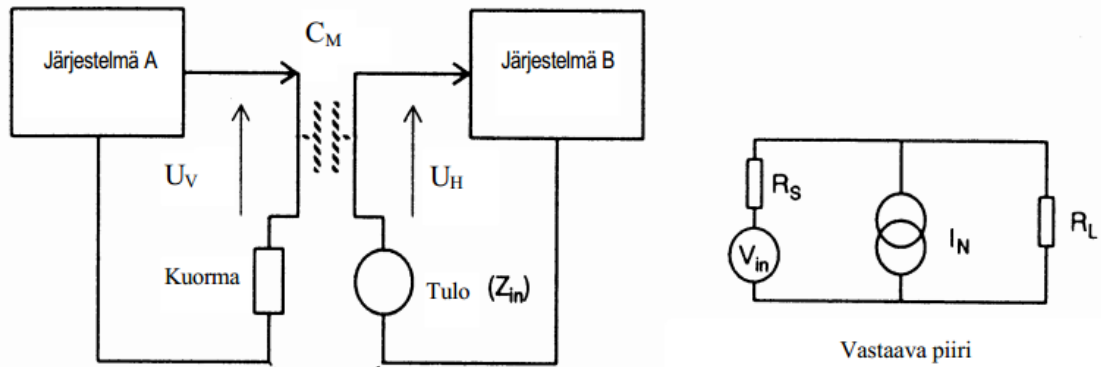
ϵ_r on suhteellinen permittiivisyys []

ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys $8,85 \cdot 10^{-12} [F/m]$

A on johtojen väliin jäävä pinta-ala [m^2]

d on johtojen etäisyys toisistaan [m]

Jos virtajohdon lähellä on vaikkapa signaalikaapeli, kaapeleiden välille muodostuu keskinäiskapasitanssi. Jos virtajohtimeen syntyy erittäin nopeita pulsseja tai häiriöpiikkejä, nämä saattavat kytkeytyä signaalijohtimeen ja mahdollisesti aiheuttaa laitteelle häiriötilan. [3, s. 22–23.]



Kuva 7. Kapasitiivinen Kytkeytyminen kahden järjestelmän välillä [3, s. 22–23].

$$U_H = \frac{R}{\frac{1}{j2\pi f C_M} + R} U_V \quad (2)$$

U_H on kapasitiivisesti kytkeytynyt jännite [V]
 U_V on häiritsevän johdon jännite [V]
 R on signaalijohdon vastus [Ω]
 f on kytkeytyneen häiriön taajuus [Hz]

Jos kaapeleiden välinen keskinäiskapasitanssin C_M reaktanssi on suurempi kuin R häiriötaajuudella, kaava (2) voidaan esittää kaavan (3) mukaisesti [3, s. 22–23].

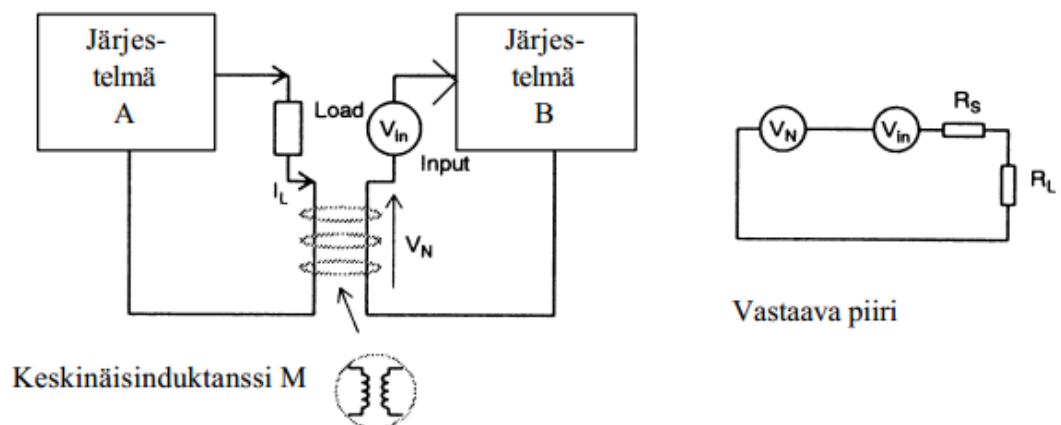
$$|U_H| = 2\pi f R C_M U_V \quad (3)$$

Kaavasta (3) nähdään, että häiriöjännite U_H on suoraan verrannollinen signaaliin taajuuteen, signaalijohdon vastukseen, johtojen keskinäiskapasitanssiin ja häiritsevän johdon jännitteeseen [3, s. 22–23].

Kapasitiivista kytkeytymistä eri järjestelmien välillä on vaikea kokonaan eliminoida, mutta tähän voidaan vaikuttaa järjestelmien suunnitteluvaiheessa. Kaavasta (3) nähdään, että muuhun on vaikea vaikuttaa paitsi järjestelmien keskinäiskapasitanssiin. Keskinäiskapasitanssia voidaan pienentää kasvattamalla järjestelmien etäisyyttä, suojaamalla signaalijohdin maadoitetulla suojavaipalla, sijoittamalla johtimet kulkemaan maatasoa pitkin tai pienentämällä järjestelmien väliaineen permittiivisyyttä. [3, s. 22–23.]

2.2.3 Induktiivinen kytkeytyminen

Toisin kuin kapasitiivinen kytkeytyminen, joka tapahtuu sähkökentän välityksellä, induktiivinen kytkeytyminen tapahtuu magneettikentän vaikutuksesta. Esimerkiksi virrallinen verkkojohto, jossa kulkee 50 Hz:n siniaalto, synnyttää ympärilleen muuttuvan magneettikentän. Jos verkkojohdon vieressä signaalijohdin, niin verkkojohdossa tapahtuvat häiriöt näkyvät myös signaalijohtimessa magneettikentän vaikutuksesta. [3, s. 23–24.]



Kuva 8. Induktiivinen kytkeytyminen kahden järjestelmän välillä [3, s. 23–24].

Virralliseen johtimeen syntyvä magneettikenttä voidaan laskea kaavalla (4) [3, s. 23–24].

$$H = \frac{I}{2\pi r} = \frac{B}{\mu} \quad (4)$$

H on syntyneen magneettikentän voimakkuus [A/m]

I on häiritsevässä johdossa kulkeva summavirta [A]
 r on etäisyys [m]
 B on vuontiheys [T/m²]
 μ on permeabiliteetti [Vs/Am]

Signaalihohtimeen indusoitunut jännite lasketaan kaavalla (5) [3, s. 23–24].

$$u = -\frac{d}{dt} \int_A \vec{B} \cdot \vec{dA} = -mA \frac{dH}{dt} = -\frac{\mu A}{2\pi r} \frac{dI}{dt} \quad (5)$$

u on indusoituneen jännitteen suuruus [V]
 A on johdinsilmukan pinta-ala [m²]
 $\frac{dI}{dt}$ on häiritsevän virran muutosnopeus [A/s]

Kaavasta (5) huomataan, että indusoitunut jännite on suoraan verrannollinen johdinsilmukan pinta-alaan ja häiritsevän virran muutosnopeuteen eli taajuuteen ja kääntäen verrannollinen johtimien etäisyyteen. Jos johdinsilmukan pinta-alaa pystytään pienentämään, virran muutosnopeutta hidastamaan tai johtimien etäisyyttä kasvattamaan toisistaan, häiriöjännitettä saadaan mahdollisesti pienennettyä. Kierretyn parikaapelin käyttö on tehokas suojamenetelmä induktiivisia häiriöitä vastaan. Johdinsilmukan pinta-ala pysyy pienenä, jolloin kytkeytyvä häiriö on myöskin pieni. Siirtämällä häiritsevä lähde kauemmas saadaan mahdollisesti häiriötaso laskettua alemmaksi. Häiritsevä lähde voidaan myös koteloida häiriöiden vaimentamiseksi. Toisaalta myös signaalilinoja voidaan suojata metallisuoilla. [3, s. 23–24.]

2.2.4 Säteilemällä tapahtuva kytkeytyminen

Kun järjestelmään syötettävän tehon taajuudet ovat pieniä, niin suurin osa tehosta muuttuu lämpöhäviöksi ja/tai varastoituu sähkö- ja magneettikenttään. Kun syötettävän tehon taajuus kasvaa, niin teho ei pelkästään muutu lämmöksi ja varastoidu kenttiin, vaan osa tehosta muuttuu säteilyenergiaksi järjestelmässä. [3, s. 25.]

Sähkömagneettista säteilyä tutkittaessa on hyvä tietää aallonpituuden ja taajuuden välinen suhde.

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (6)$$

λ on aallonpituus [m]
 f on taajuus [Hz (1/s)]
 c on valon nopeus tyhjiössä [m/s]

Ulkoinen sähkömagneettinen kenttä voi kytkeytyä suoraan sähkölaitteen sisäisiin johtimiin. Sähkölaitteiden ulkoiset liityntäjohdot toimivat kuin antennit ja säteilevät yhteismuotoista häiriötä. Ne sekä lähettävät että vastaanottavat sähkömagneettista häiriötä antennin ominaisuuksien mukaisesti. Kun häiriötaajuus on alle 200 MHz, se todennäköisimmin kytkeytyy liityntäjohtoihin. Häiriötaajuuden ollessa yli 200 MHz se kytkeytyy todennäköisemmin laitteen sisäiseen johdotukseen ja piirilevyssä oleviin silmukoihin. [3, s. 25.]

Kun häiriön taajuus on sama kuin kaapelin resonanssitaajuus, kytkentämekanismi on voimakkain. Resonanssitaajuuden suuruus riippuu kaapelin fysikaalisista mitoista ja kaapeliin kytketyn kuorman reaktanssista. Johdon pituuden ollessa λ , ympäristön sähkömagneettinen häiriö kytkeytyy siihen parhaiten ja pituuden ollessa $\lambda/2$ johto säteilee sähkömagneettista häiriötä ulospäin voimakkaimmin. Sähkölaitteen kotelon raot ja saumat toimivat kuten rakoantenni. Raot ja liityntäjohdot vastaanottavat ja säteilevät sähkömagneettista häiriötä samoin tavoin. [3, s. 25.]

Sähkömagneettisesta säteilystä aiheutuvien häiriöiden hallitseminen on yksi vaikeimmista ja keskeisimmistä EMC-ongelmista. Se vaatii syvällistä perehtymistä sähkömagneettiseen teoriaan. Joitakin säteilyn kytkentymisen vaimentamiskeinoja ovat [3, s. 25]:

- Pienennetään eromuotoista virtaa minimoimalla piirilevyn ja sisäisen johdotuksen silmukat.
- Vältetään $\lambda/4$, $\lambda/2$ ja niiden kerrannaisten pituisia liityntäjohtoja.
- Sijoitetaan sähkölaite mahdollisimman tiiviiseen, metalliseen tai metalloituun koteloon, joka on maadoitettu.

3 EMC-mittaukset

Tehdyissä mittauksissa käytettiin IEC 61967-1, IEC 61967-2, IEC 61967-8, IEC 62132-1, IEC 62312-2 ja IEC 62312-8 standardeja.

3.1 Mittalaitteet

Vahvistimet

Mittauksissa käytettiin 40AD1-, 50W1000B- ja 50S1G4A -RF-vahvistimia. Kaikki vahvistimet ovat Amplifier Researchin (AR) valmistamia. Vahvistinmalli 40AD1 on teholtaan 40 W, joka toimii DC–1 MHz:n taajuusalueella. Mallit 50W1000B ja 50S1G4A ovat molemmat teholtaan 50 W:n vahvistimia, joiden taajuusalueet ovat 1–1000 MHz sekä 1–4,2 GHz. Näin testin taajuuskaistaksi saadaan 10 kHz–4,2 GHz. Vahvistimet asetetaan suurimmalle vahvistukselle. Mittausohjelmisto säätää kentänvoimakkuutta signaaligeneraattorin tehoa säätämällä käyttäen takaisinkytkentämittausta.

Signaaligeneraattori

Signaaligeneraattorina toimii Keysight N5171B, jonka taajuusalue on 9 kHz–6 GHz ja tehonsyöttökyky -144...+26 dBm. Signaaligeneraattoria ohjataan tietokoneella, joka säätää tehon sekä taajuuden. Näin saadaan testiajot automatisoitua.

Tehomittari

Työssä käytetään Rohde & Schwarz URV55 -millivolttimittaria, jota käytetään takaisinkytkentämittauksessa. Mittariin on saatavilla erilaisia mittapäitä eri taajuusalueille. Työssä käytetään URV5-Z2- sekä NRV-Z2 -mittapäitä. URV5-Z2:n taajuusalue on 9 kHz–3 GHz ja tehonkesto 1 nW–2 W (-60...+33dBm). NRV-Z2 pystyy mittaamaan korkeammalle taajuudelle eli 10 MHz–18 GHz, mutta sen tehonkesto on pienempi eli 20 nW–500 mW (-47...+27dBm).

RF-analysaattori

Mittauksissa käytetään myös Agilent Technologies FieldFox N9914A -RF-analysaattoria. Se on mukana kulkeva laite, joka on ensisijaisesti tarkoitettu kaapeleiden ja antennien kenttämittauksiin. Työssä sillä mitataan kammioden VSWR-taajuusvaste ja emissiotesteissä analysaattori toimii spektrianalysaattorina. VSWR eli voltage standing wave ratio kuvaa, kuinka paljon tehoa heijastuu antennista takaisin tehoa syöttävään piiriin. RF-analysaattoria voidaan ohjata tietokoneelta ethernet-kaapelilla, mikä mahdollista emissiotestien automatisoinnin. Mittaustulokset on myös mahdollista tallentaa suoraan USB-muistiin laitteesta. Näin käsin tehdyn mittauksen tulos on helppo lisätä raporttiin.

3.2 Piirilevy

EMC-testilevyn fyysisen koon pitää olla 100 x 100 mm, ja levyn kulmissa voi tarvittaessa olla reiät. Piirilevyn paksuus on 1,6 mm. Vähintään 5 mm:n levyinen alue (10 mm olisi parempi) on jätettävä johtavaksi levyn ulkoreunaan kaikille sivuille, jotta saadaan hyvä ja luotettava sähköinen kontakti testikammioon. Tämä voidaan tehdä joko tinaamalla kyseinen alue tai jollain muulla menetelmällä. [4, s. 37–43.]

Työssä on jätetty testilevyihin 10 mm:n avaus juotteenestopinnoitteeseen ja paljastunut kupari on päällystetty ENIG-pinnoitteella. ENIG eli electroless nickel immersion gold pinnoite on piirilevyvalmistuksessa käytetty pinnoite, jolla suojataan piirilevyn kupari oksidoitumiselta ja parannetaan juotettavuutta.

Testilevyn rakenteen pitää olla vähintään 2-kerrospiirilevy. Tarvittaessa voidaan tehdä useampikerroksinen piirilevy. Kun tehdään 4-kerrospiirilevy, niin kerrosrakenteen tulisi olla seuraavanlainen: Ensimmäisen kerroksen tulisi olla maataso. Toinen kerros on tarkoitettu käyttöjännitteille. Kolmas kerros on tarkoitettu signaalivedoille. Neljäs kerros sallii käyttöjännite- ja signaalivetoja, mutta siinä olisi tavoiteltava mahdollisimman yhtenäistä maatasoa. DUT (Device Under Test) eli testattava tuote, sijoitetaan ensimmäiseen kerrokseen, ja jos DUT tarvitsee joitain oheiskomponentteja toimiakseen stabiilisti ja luotettavasti, ne tulisi asentaa vastakkaiselle puolelle (4. kerros). Kerrosrakenne ja komponenttien sijoittelu on havainnollistettu kuvassa 9. [4, s. 37–43.]

Eri kerroksien maatasot on yhdistettävä luotettavasti toisiinsa, jotta levyn toiminnassa ei olisi kompromisseja. Kerroksien maatasot yhdistetään läpivienneillä taulukon 1 mukaisesti. Läpiviennit on jaoteltu kolmeen eri alueeseen, läpivientialue 1, 2 ja 3. Alueiden sijainnit näkyvät katkoviivoin kuvasta 9.

Taulukko 1. Läpivientien koot ja sijainti levyllä. [4, s. 37–43]

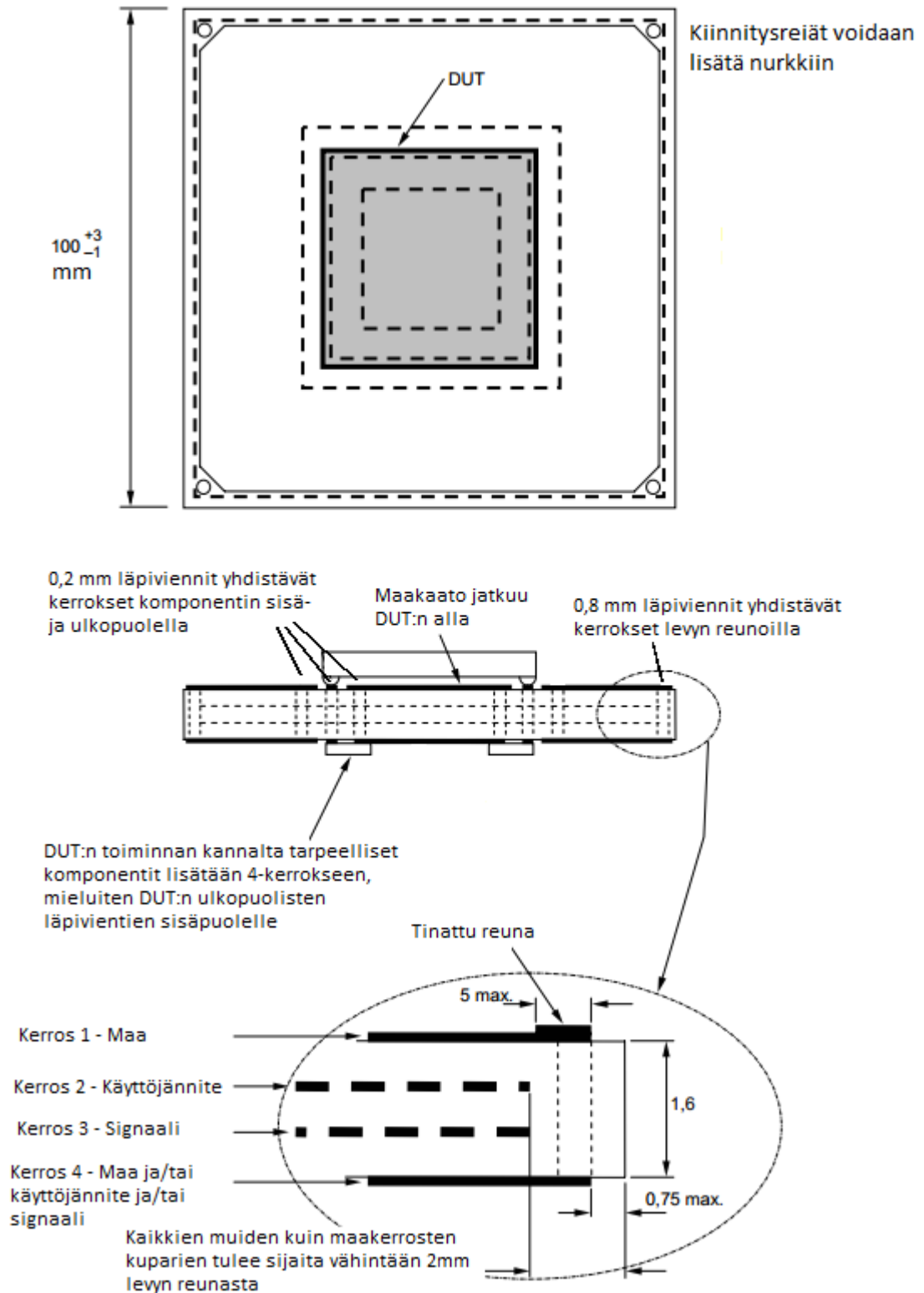
Läpivientialue	Sijainti	Läpiviennin reiän halkaisija
1	Levyn reunoilla	0,8 mm
2	Juuri DUTin ulkopuolella	0,2 mm
3	Juuri DUTin sisäpuolella	0,2 mm

IEC 62132-1 sanoo, että maatasot yhdistävien saman alueen läpivientien tulisi olla enintään 10 mm etäisyydellä toisistaan [4, s. 37–43].

Työssä DUT on pintaliitoskomponentti (eng. SMD, Surface Mount Device), joten standardi IEC 62132-1 suosittelee läpivientien sijoittamista suoraan juotettavien jalkojen keskelle. Vetojen pituuksien, läpivientien sijoitusten ja komponentin orientaation tulee olla optimoitu siten, että piirilevylle ei muodostu silmukoita tai ne pidetään mahdollisimman pieninä. Näin silmukoihin ei muodostu asiaankuulumattomia häiriövirtoja. Huonosti suunnitellun levyn kanssa on riski, että testissä tutkitaan piirilevyn suorituskykyä DUT:n suorituskyvyn sijasta. [4, s. 37–43.]

Tulos huonolla piirilevyllä saattaa sisältää merkittävää epävarmuutta ja virheellisen tuloksen. Tuote saattaa olla joko alitestattu tai ylitestattu, jolloin heikkoudet eivät joko tule esiin tai sitten tulos ylitestauksen tapauksessa saatetaan hylätä ilman syytä.

Kuvasta 9 näkee esimerkin levyn mitoista ja taulukon 1 läpivientialueiden sijainnin. Katkoviivat kuvaavat läpivientien sijaintia. Uloin katkoviiva on 1. alue. DUTin ulkopuolella oleva katkoviiva kuvaa aluetta 2. DUTin sisäpuolella oleva katkoviiva kuvaa läpivientejä signaaleille. Läpiviennit ovat suoraan DUTin jalkojen alla. Sisin katkoviiva DUTin sisällä on 3. alue. [4, s. 37–43.]



Kuva 9. Standardin suositukset levyn ominaisuuksista. Eri läpivientien alueet on merkattu katkoviivoin ylem্পään kuvaan. [4, s. 37–43.]

Kuva käytetystä testilevystä on esitetty liitteessä 1. Testilevyssä 1. läpivientialueen (Taulukko 1) läpiviennit ovat 0,8 mm:n kokoisia, 4 mm:n välein toisistaan ja 6 mm levyn reunasta. Toisen alueen läpiviennit eivät ole aivan DUTin vieressä, ja ne ovat 0,6 mm:n kokoisia. Kolmannen alueen läpiviennit DUTin alta puuttuvat kokonaan. Signaalien läpiviennit ovat 0,6 mm:n kokoisia ja ne eivät mene suoraan DUTin jalkoihin vaan niissä on pieni veto 1. kerroksessa. Tämä ei ole täysin standardin mukainen. Kun seuraa-va testilevy tehdään, levyllä tulisi muokata läpivientien sijoittelua ja kokoa, jotta se olisi enemmän standardin mukainen.

SPI-kommunikointi ja käyttöjännite tuodaan levyllä SMA-liittimillä. SPI (Serial Peripheral Interface bus) on synkroninen sarjamuotoinen kommunikointiväylä. SPI-kommunikointia käytetään yleisesti sulautetuissa järjestelmissä esimerkiksi mikrokontrollerin ja antureiden välillä. Aikaisemmin Muratalla on käytetty läpijuotettavia liittimiä, mutta IC stripline -kammiossa näitä ei voida käyttää, koska levyn pitää olla tasainen liittinten kohdista. Sen vuoksi tässä työssä käytettiin pintaliitosliittimiä.

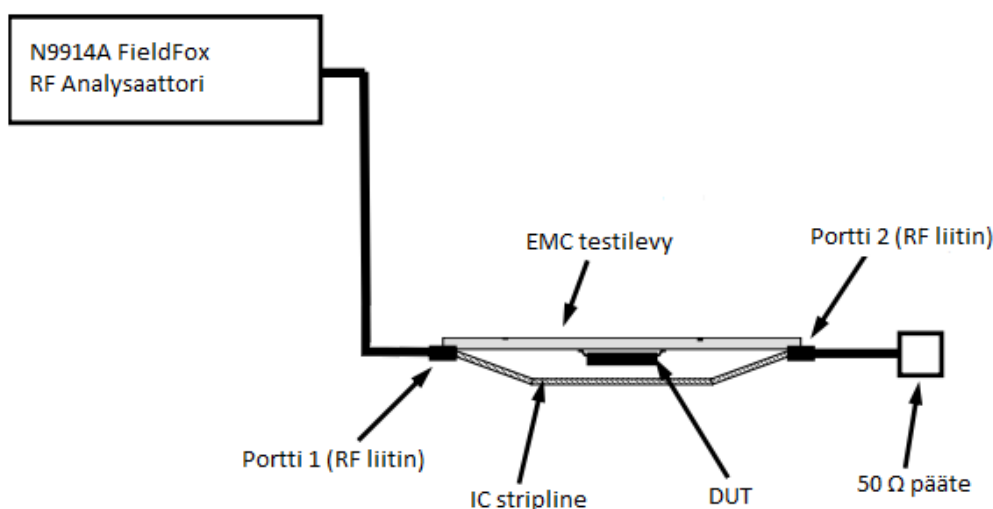
Vedot piirilevyllä on yritetty optimoida 50 Ω :n vedoiksi. Kun vetojen impedanssia sovitaa, kannattaa olla yhteydessä piirilevyvalmistajaan. Valmistajat voivat laskea vedon leveyden omille materiaaleilleen ja kerroksien paksuuteen nähden. Valmistusvaiheessa he myös tekevät tarkistuskupongin, mistä he mittaavat vedon impedanssin. Vedon impedanssi riippuu vedon leveydestä ja referenssikerroksen etäisyydestä vetoon nähden ja välimateriaalin sähköisistä ominaisuuksista. Kuparin paksuudella ei ole merkittävää vaikutusta impedanssiin, kun pysytään normaaleissa kuparin paksuuksissa piirilevyvalmistuksessa (17 μm tai 35 μm).

3.3 Kammiot

Tässä työssä käytettävät kammiot ovat FCC-TEM-JM3 TEM-kammio ja μSL 80A2 IC Stripline -kammio. Kammio on kuin avattu koaksiaalikaapeli ja sisäjohtin on antenni eli septum. Sähkömagneettinen kenttä muodostuu septumin ja kammion kannen väliin. Emissiotesteissä septum on vastaanottava antenni tai stripline. Kammiot ovat pieniä, ja niillä on helppo mitata erilaisten mikropiirien sähkömagneettista suorituskkyä. Kammiosta mitattiin niiden VSWR-arvo, jolla todennetaan, kuinka hyvin ne toimivat taajuusalueen yli.

VSWR-arvo kertoo impedanssin yhteensopimattomuuden määrästä siirtolinjojen ja lähteen tai kuorman välillä. Se myös kertoo, kuinka suuri seisova aalto jää siirtolinjaan tämän seurauksena. Jos VSWR-arvo on korkea, se tarkoittaa sitä, että kohteesta heijastuu paljon tehoa takaisin siirtolinjaan, mikä ei ole suotavaa. Jos VSWR-arvo on 1, se tarkoittaa sitä, että siirtolinja ja kohde on täydellisesti sovitettu ja yhtään tehoa ei heijastu takaisin siirtolinjaan.

VSWR mitattiin N9914A FieldFox RF-analysaattorilla. Laite asetettiin piirianalyssaattori (NA), Network Analyzer -moodiin ja valittiin portin S11 SWR -mittaus. On tärkeää huomioida, että laite tulee kalibroida ennen mittauksen aloittamista. Näin mittakaapelin vaikutus saadaan pois tuloksesta. Kalibroinnin jälkeen taajuusaluetta tai muita asetuksia ei tule säätää, sillä muuten joutuu kalibroimaan laitteen uudestaan. Kalibrointi tehdään päätevastussarjalla ja laitteen omalla kalibrointisekvenssillä. Kun RF-analyssaattori on kalibroitu, kytketään se mitattavaan kammioon. Kammion toiseen porttiin kytketään 50 Ω :n pääte. Kuvasta 10 nähdään mittauskytkentä.



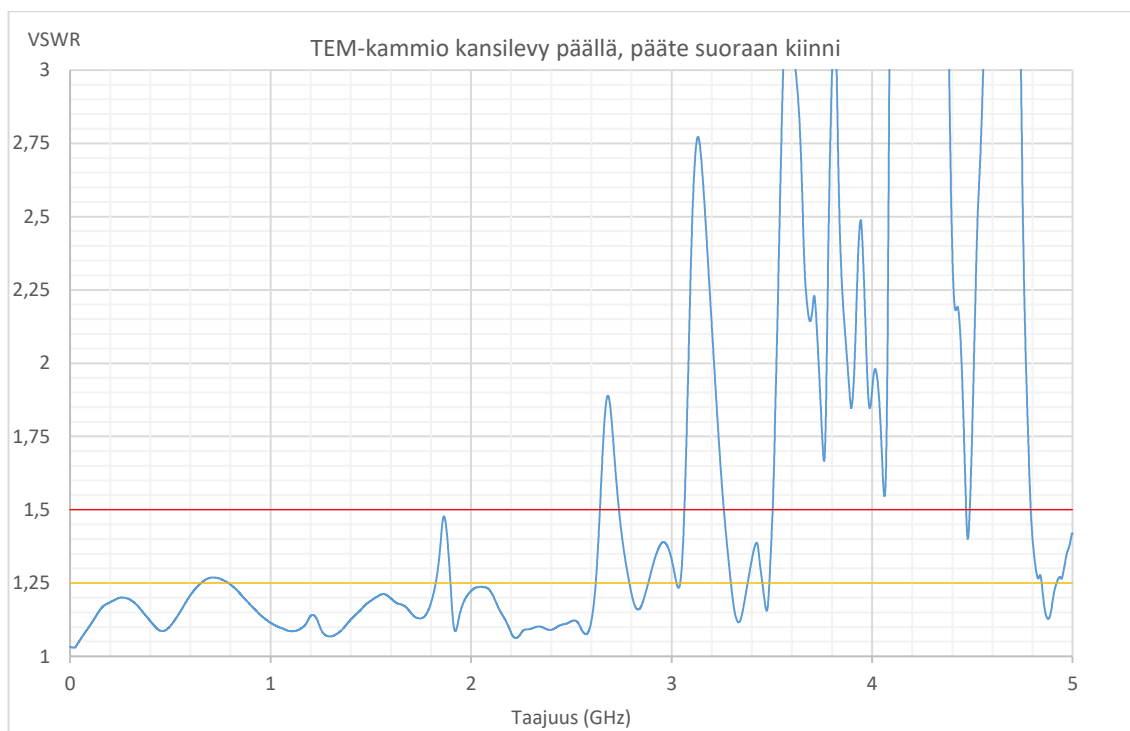
Kuva 10. VSWR-mittauskytkentä. Kammioon on kytketty 50 Ω :n pääte ja RF-analyssaattori. Kammio mitataan testilevy sekä kammion kansi asennettuna.

Standardeissa 61967-2, 61967-8, 62132-2 ja 62132-8 määritellään kammiodien karakterisoinnit hieman eri tavoilla. Standardeissa 61967-8 ja 62132-8 (IC Stripline emissio-

ja immunitteettistandardit) määritellään, että VSWR-arvon tulisi olla alle 1,25. Kaikki taajuudet, joilla arvo ylittää tuon, tulisi hylätä mittaustuloksista. VSWR-mittaus tulisi tehdä tyhjällä kammiolla sekä kammiolla, jossa on jännitteetön DUT sisällä. Standardeissa 61967-2 ja 62132-2 (TEM emissio- ja immunitteettistandardit) määritellään kammion karakterisointi hieman eri tavalla. Standardi 61967-2 määrittelee vain, että kammion mitatun VSWR-arvo tulisi olla alle 1,5 taajuusalueen yli. Standardi 62132-2 lisää tähän, että mitatun VSWR-arvon olisi hyvä olla alle 1,2. Niille taajuuksille, millä kammio ylittää arvon 1,2 mutta on alle 1,5, tulisi suorittaa sähkö- ja magneettikentän karakterisointi standardin 62132-2 liitteen A mukaan. Jos sama immunitteettimittaus tehdään kahdella eri kammiolla, valitaan mittaustulos, missä on pienempi mitattu VSWR-arvo.

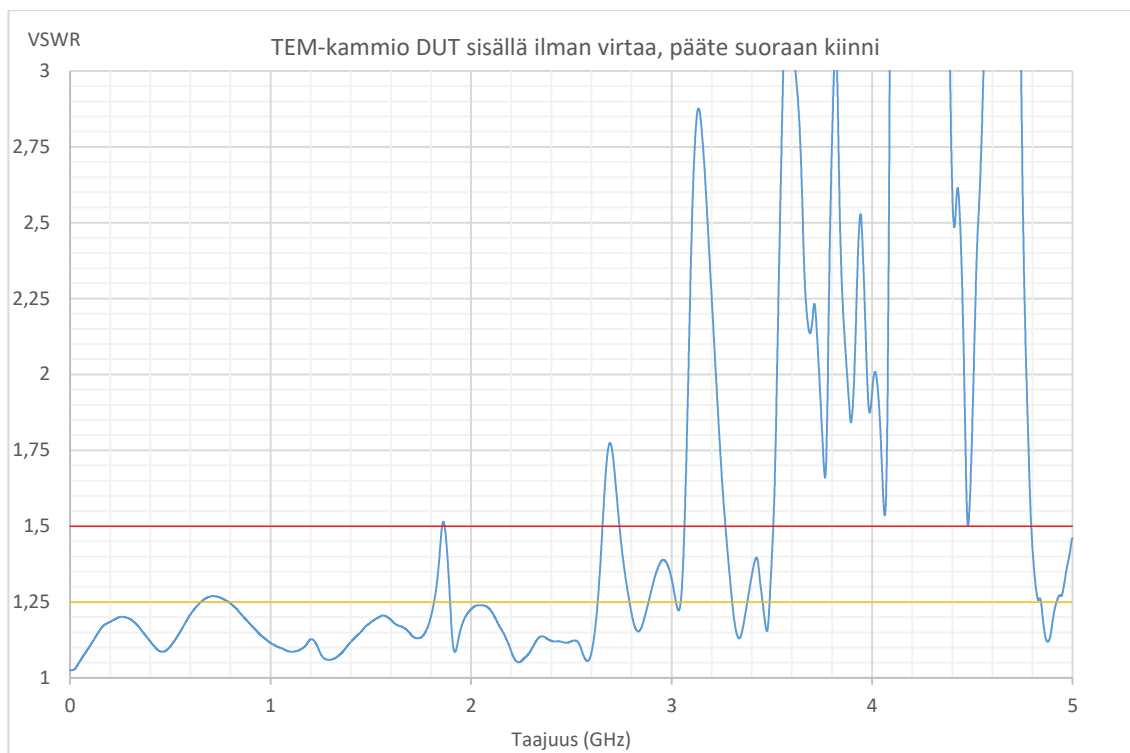
TEM-kammio

FCC-TEM-JM3 on Fischer Custom Communications:n valmistama TEM-kammio. Taajuusalue on DC–2 GHz. Sen septumin etäisyys mitattavan piirilevyn pinnasta on 43 mm. DUT:n koko saa olla maksimissaan 60 x 60 x 10 mm kammion datalehden mukaan. Kammiossa on N-tyyppin liittimet. Valmistaja lupaa VSWR:n olevan alle 1,25 käytettävän taajuusalueen yli. Alla on mitattuja VSWR arvoja eri konfiguraatioilla.



Kuva 11. VSWR-arvo, kun TEM-kammion päällä on sen oma metallinen kansilevy ja pääte on suoraan kammiossa kiinni. Pystyakselilla on mitattu VSWR-arvo ja vaaka-akselilla taajuus. Keltainen viiva on 1,25 VSWR-raja ja punainen on 1,5 VSWR-raja.

Mittauksissa ei päästy valmistajan lupaamaan alle 1,25 arvoon koko taajuusalueen yli, vaan 1,85 GHz:n VSWR-arvo on jopa yli 1,5. VSWR-arvo on yli 1,5 2,6 GHz:n jälkeen, mikä on aivan odotettavaa. Taajuudella 1,85 GHz ei voida luotettavasti laskea kammiossa esiintyvää kentänvoimakkuutta pelkästään kammioon syötettävän tehon perusteella. Tällä taajuudella kammiossa voi olla joko suurempi tai pienempi kenttä kuin on laskettu. Taajuudella 1,85 GHz saatuja tuloksia ei tulisi tämän takia ottaa huomioon. Tämän mittauksen perusteella kammiota voisi käyttää jopa 2,5 GHz:n asti.

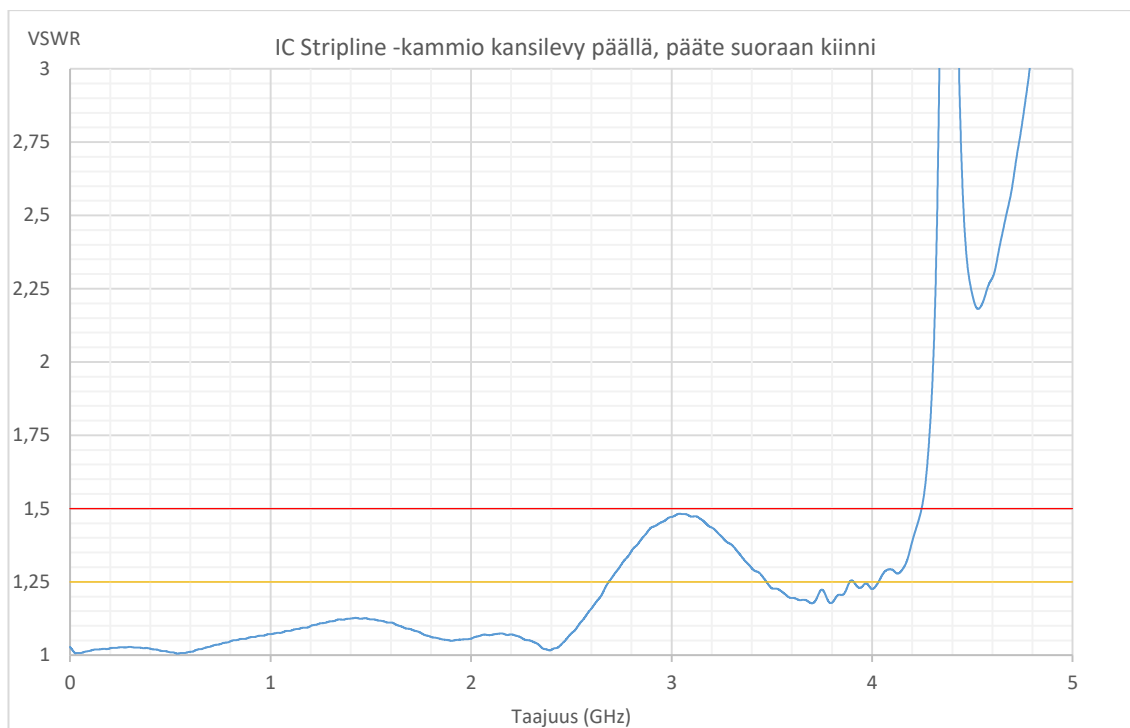


Kuva 12. VSWR-arvo, kun testilevy on asetettu TEM-kammioon ja pääte on suoraan kammiossa kiinni. Pystyakselilla on mitattu VSWR-arvo ja vaaka-akselilla taajuus. Keltainen viiva on 1,25 VSWR-raja ja punainen on 1,5 VSWR-raja.

VSWR käyrä ei juuri muutu, oli kammion päällä sitten pelkkä kansilevy tai testilevy.

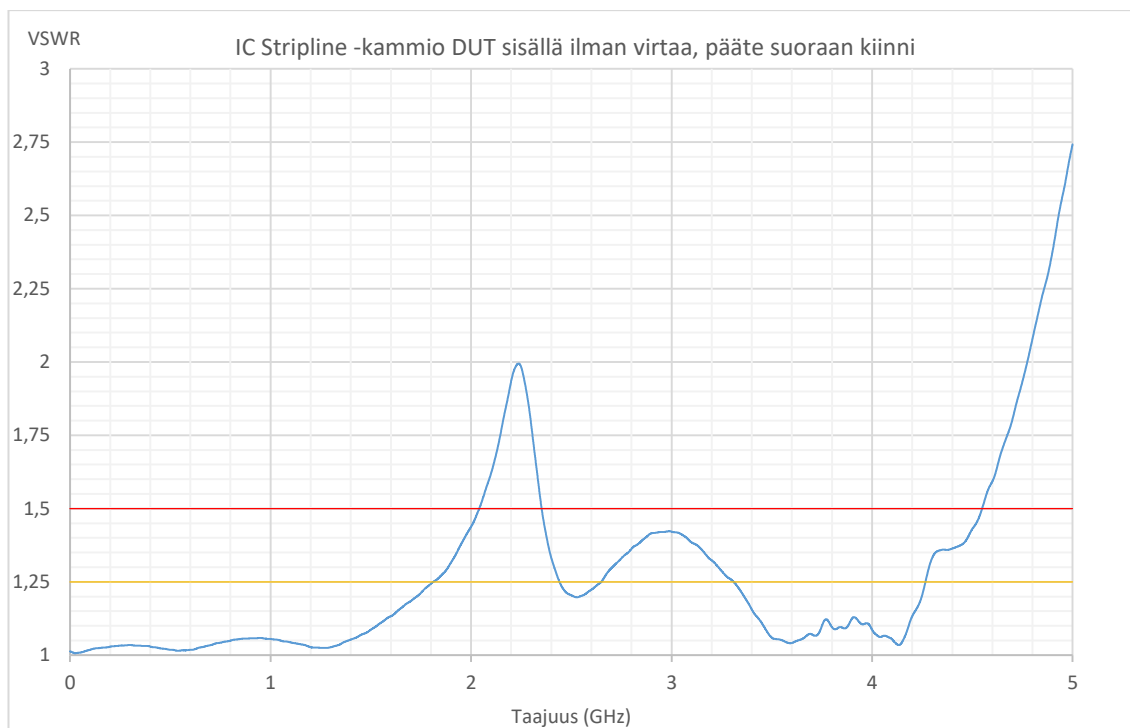
IC Stripline -kammio

μSL 80A2 on Ingenieur – Dienstleistung Körper:n valmistama IC Stripline -kammio. Taajuusalue on DC–4,2 GHz. Striplinen leveys on 27 mm, pituus 35 mm ja striplinen etäisyys mitattavan piirilevyn pinnasta on 8 mm. Näin suurin DUT, joka kammioon mahtuu, on 29,7 x 29,7 x 4,0 mm. Standardi suosittelee, että DUT:n korkeus olisi 1/3 striplinen etäisyydestä kansilevyyn, mutta sanoo, myös että ½ vielä menettelee. Työssä DUT:n korkeus on 4,3 mm. Kammion liittimet ovat SMA-naarasliittimet. Valmistaja lupaa VSWR-arvon olevan alle 1,25 käytettävän taajuusalueen yli. Kuvista 13, 14 ja 15 näkee mitattuja VSWR-arvoja eri konfiguraatioilla.



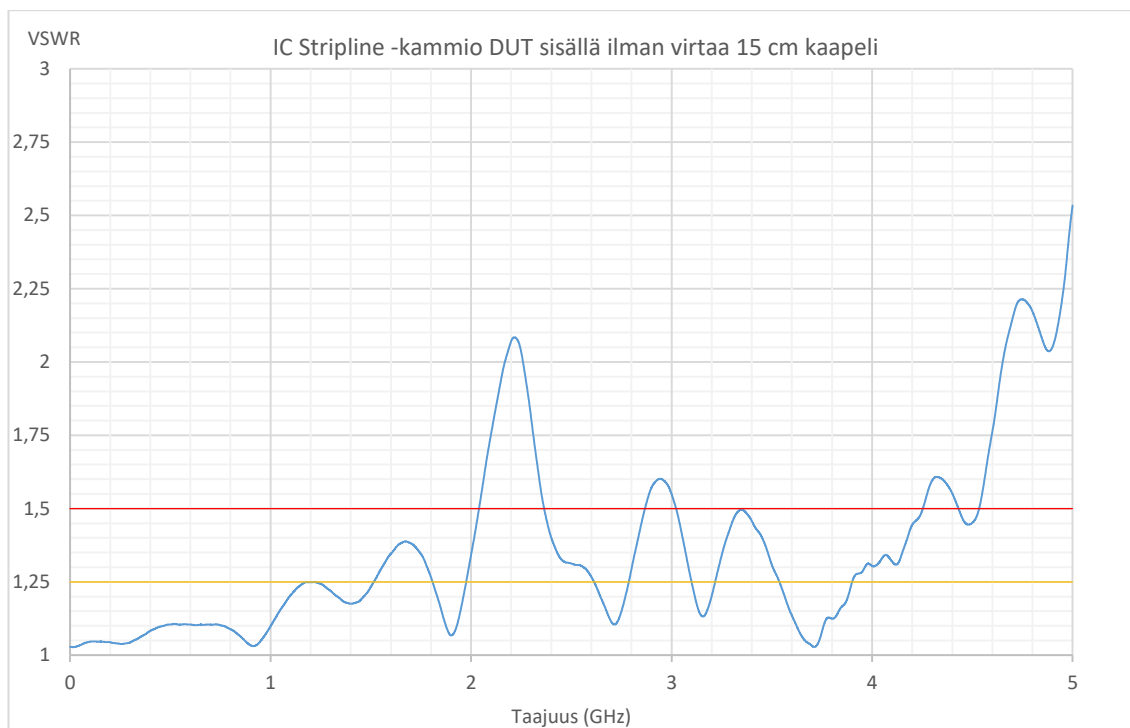
Kuva 13. VSWR-arvo, kun IC Stripline -kammion päällä on sen oma metallinen kansilevy ja pääte on suoraan kammiossa kiinni. Pystyakselilla on mitattu VSWR-arvo ja vaakakselilla taajuus. Keltainen viiva on 1,25 VSWR-raja ja punainen on 1,5 VSWR-raja.

Mittauksissa ei päästy valmistajan lupaamaan alle 1,25 arvoon koko taajuusalueen yli. Taajuuksilla 2,7–3,5 GHz VSWR on yli 1,25 mutta alle 1,5. Taajuuden 4,2 GHz:n jälkeen VSWR on yli 1,5, mikä on aivan odotettavaa.



Kuva 14. VSWR-arvo, kun testilevy on asetettu IC Stripline -kammioon ja pääte on suoraan kammiossa kiinni. Pystyakselilla on mitattu VSWR-arvo ja vaaka-akselilla taajuus. Keltainen viiva on 1,25 VSWR-raja ja punainen on 1,5 VSWR-raja.

Kun kammioon asetettiin testilevy ja mitattiin VSWR-arvo, kuvaajaan ilmestyi uusi piikki 1,8–2,5 GHz:n välille, muuten käyrä oli melko samanlainen. Alueella 2,0–2,4 GHz VSWR-arvo ylittää 1,5:n. Siksi tämä taajuusalue tulisi jättää huomioimatta tuloksissa. Tämä ero pelkällä kansilevyllä mitattuna johtuu siitä, että kammion sisällä on tuote, jonka vuoksi sähkökenttä hieman muuttuu. Mitattava tuote on hieman liian korkea mitatakammioon, jolloin kammio ylittää sallitun VSWR-arvon rajusti.



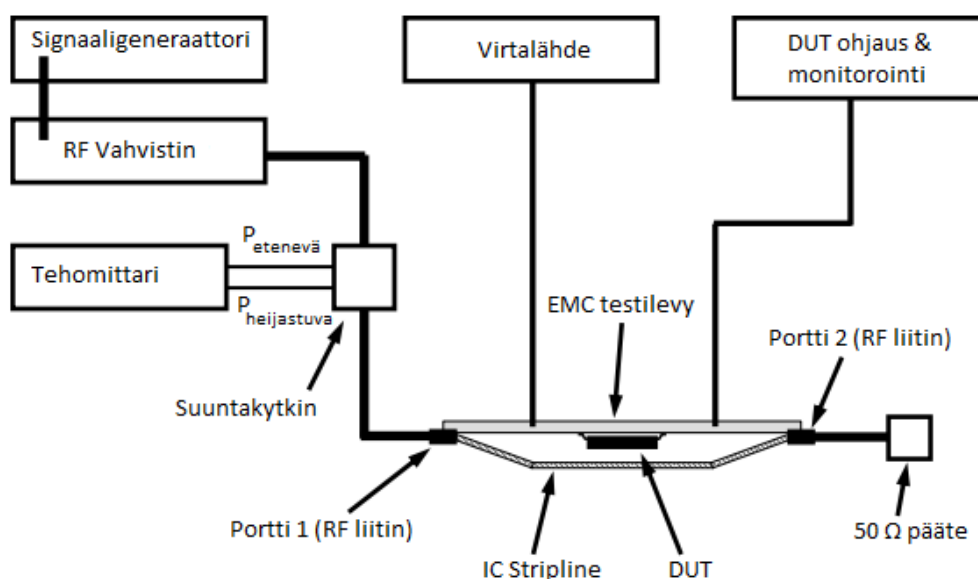
Kuva 15. VSWR-arvo, kun testilevy on asetettu IC Stripline -kammioon ja pääte on 15cm:n kaapelilla kiinni. Pystyakselilla on mitattu VSWR-arvo ja vaaka-akselilla taajuus. Keltainen viiva on 1,25 VSWR-raja ja punainen on 1,5 VSWR-raja.

Jos 50 Ω :n pääte kytketään 15 cm:n kaapelilla kammioon, niin käyrässä alkaa näkyä soimista. Soimisella tarkoitetaan sitä, että systeemin impedanssisovitus on huono ja siihen syntyy seisovia aaltoja. Tietyillä taajuuksilla nämä summautuvat signaaliin ja toisilla taajuuksilla ne vaimentavat syötettävää signaalia. Tämän takia kuvaajaan syntyy korkeita piikkejä ja matalia laaksoja. Tässä mittauksessa VSWR-arvo ylittää 1,25 ja 1,5 arvon useissa kohtaa. Immunitteetti- ja emissiomittaukset suoritettiin tällä kokoonpanolla. Kun kaapelin pituutta tästä vielä kasvatettiin, niin soiminen vahvistui ja piikit ja laaksot olivat suurempia.

4 Immuneittitesti

Immuneittitestillä mitataan, kuinka DUT sietää RF-taajuuksista sähkömagneettista häiriötä. Standardi IEC-62132-1 määrittelee immuneittitestejä yleisellä tasolla. IEC-62132-2 tarkentaa TEM-kammiolla tehtäviä testejä ja IEC-62132-8 IC Stripline -kammiolla tehtäviä. Työssä on pyritty tekemään mittaukset näiden standardien mukaan.

Signaaligeneraattori syöttää häiriön RF-vahvistimelle, missä häiriösignaali vahvistetaan halutulle tasolle. Tämän jälkeen häiriösignaali viedään suuntakytkimelle, josta saadaan takaisinkytkentä systeemin säätöä varten. Etenevän signaalin teho mitataan tehomittarilla, josta tietokone laskee tarvittavan signaalin tehon. Tietokone sitten säätää tarvittaessa signaaligeneraattoria, ja haluttu kentänvoimakkuus saavutetaan mittakammiossa. Suuntakytkimeltä häiriösignaali viedään mittakammioon. Kammion toisessa päässä on 50 Ω :n pääte. Kuvasta 16 näkyy tämä mittauskytkentä.



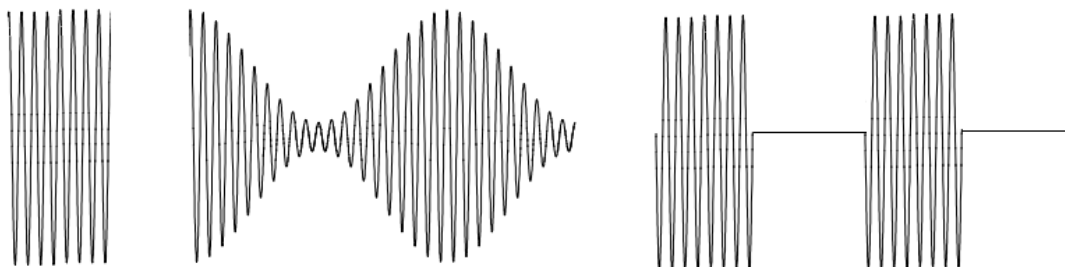
Kuva 16. Immuneittimittauskytkentä [2, s. 9].

Testilevy asetetaan mittakammioon ja levyyn kytketään tarvittavat virtakaapelit ja SPI-kommunikointikaapelit. Virta syötetään akustosta, jonka jännite reguloidaan sopivaksi. Reguloitu jännite menee vielä suodattimen kautta levyille, jolla estetään häiriön kytkeytymistä takaisin regulaattorille. Seuraavaksi käynnistetään testisovellus, joka suorittaa mittauksen. Testisovellus on tehty LabView'lla. Ensiksi tarkistetaan, että tuote kommu-

nikoi tietokoneen kanssa oikein. Tämä tehdään tuotelevyä kääntelemällä ja katsomalla, muuttuuko tuotteen ulostulo sovelluksessa.

Testisekvenssi aloitetaan, kun tuote on todettu toimivaksi. Sekvenssi pyytää mittalaitte- sekä mittausparametrejä. Oikeat mittalaitteet skannataan viivakoodinlukijalla. Tämä pienentää riskiä kirjata väärä mittalaite mittaustuloksiin tai käyttää mittalaitetta väärällä taajuusalueella. Samalla sekvenssi kertoo mahdollisen mitattavan taajuusalueen kyseisillä mittalaitteilla. Mittausparametrit syötetään testisovellukselle, kun mittalaitteet on skannattu. Mittausparametreihin kuuluu mm. taajuusalue, kentänvoimakkuus, tuotteen raja-arvot ja testinimi. Tämän jälkeen sekvenssi käynnistetään ja se suorittaa mittauksen taajuusalueen yli. Kun mittaus on ohi, testisovellus kirjoittaa mittaustulokset tietokantaan.

Standardin IEC-62132-1 mukaan häiriösignaalina voidaan käyttää joko tasaista sinimuotoista signaalia, sinimuotoista signaalia joka on 80 %:sti amplitudimoduloitu 1 kHz siniaallolla, tai sinimuotoista signaalia, joka on 50 %:sti pulssimoduloitu 1 kHz pulssitoistotaajuudella. Kuvassa 17 on esimerkki signaalien aaltomuodoista. [4, s. 29.]



Kuva 17. Vasemmanpuoleinen signaali kuvaa tasaista sinimuotoista signaalia, keskellä on amplitudimoduloitu signaali ja oikealla on pulssimoduloitu signaali [4, s. 31].

Tässä työssä käytetään tasaista sinimuotoista häiriösignaalia. Standardi IEC-62132-1 määrittelee häiriösignaalin taajuusasteleiden eri taajuuskaistoille taulukon 2 mukaisesti [4, s. 29].

Taulukko 2. Häiriösignaalin taajuusaskeleen suhde taajuusalueeseen [4, s. 29].

Taajuusalue (MHz)	0,15–1	1–100	100–1000
Lineaarinen askel (MHz)	$\leq 0,1$	≤ 1	≤ 10
Logaritminen askel	≤ 5 % askel		

Taulukko 2 tarkoittaa, että jos 1 MHz–10 MHz:n taajuusalue mitataan 5 %:n logaritmisin taajuusaskelin, niin siitä tulee n. 140 eri taajuuspistettä. Jos tekisimme saman taajuusalueen mittauksen standardin suurimmilla sallimilla lineaarisilla askeleilla, niin mittapisteitä olisi n. 190 kpl. Työssä koko taajuusalue mitataan 0,1 %:n logaritmisilla taajuusaskeleilla. Vastaavan taajuusalueen mittaaminen tällä askeltiheydellä tekee n. 6900 mittapistettä. Näiden taajuuksien lisäksi tulisi tarkastella kriittisiä taajuuksia ja niiden kerrannaisia, jotka voisivat olla mm. oskillaattorien taajuudet, kellotaajuus ja datalinjan kellotaajuus.

Testattava tuote voidaan mitata kahdella eri tavalla. RF-häiriösignaaligeneraattori asetetaan pienelle teholle, esimerkiksi 20 dB alle halutun sietorajan. Tämän jälkeen häiriösignaalin tehoa aletaan pikkuhiljaa kasvattamaan haluttuun rajaan. Samalla mitataan testattavan tuotteen toimintaa. Jos tuote häiriintyy ennen kuin ollaan päästy haluttuun sietorajaan, niin se kirjataan ylös. [2, s. 11]

Toinen tapa tehdä mittaus on asettaa RF-häiriösignaaligeneraattori halutulle sietorajalle ja aloittaa mittaus. Kun tuote häiriintyy jollain taajuudella niin se kirjataan ylös, jonka jälkeen aletaan laskemaan häiriötasoa, kunnes tuote palautuu normaaliin toimintaan. Häiriötaso millä testattava tuote palautuu normaaliin toimintaan, kirjataan myös ylös. Työssä mittaukset suoritettiin tällä tavalla. [2, s. 11]

Mittaukset tulee suorittaa vähintään kahdessa orientaatioissa (0°, 90°). Myös 180° ja 270° orientaatiot voidaan mitata, jos se nähdään tarpeelliseksi. [2, s. 11]

IC Stripline -kammio

Vaikka standardi IEC-62132-8 on määritelty vain 150 kHz–3 GHz:n alueelle, niin mittaukset suoritettiin laajennetulla 10 kHz–4.2 GHz:n alueelle.

TEM-kammio

Vaikka standardi IEC-62132-2 on määritelty vain 150 kHz–1 GHz:n alueelle, niin mitaukset suoritettiin laajennetulla 10 kHz–3 GHz:n alueella.

4.1 Tulokset

Mittaukset suoritettiin kolmelle eri tuotteelle, kahdella eri tuotteen suodinasetuksella ja kahdella eri orientaatiolla. Lisäksi suoritettiin vertaileva testi kaikkien neljän eri orientaation välillä. Tämä tehtiin vain yhdellä tuotteella ja yhdellä suodinasetuksella molemmille kammioille. Tuloksissa on esitetty ainoastaan yksi tuote, vaikka työssä mitattiin kolme tuotetta. Syynä siihen on, että tulokset eivät paljon eronneet toisistaan eri tuotteiden välillä. Tuloksissa vertailtiin kammioon syötetyn tehon ja tuotteen ulostulon muutosta alkutilanteesta taajuusalueen yli.

Liitteessä 2 ovat tulokset, kun on vertailtu molempia kammiota samoilla mittauseräillä, tässä tapauksessa 0° orientaatioissa. Syötettävä teho on pysynyt melko vakiona 1 GHz:n asti. Tämän jälkeen kammioiden välille on syntynyt pientä eroavaisuutta. Tämä johtuu luultavasti siitä, että kammioiden VSWR-arvot ovat hieman erilaiset korkeammilla taajuuksilla. Tuotteen yaw eli mitattu pyörimisnopeus ei muutu alkuarvosta kummallakaan kammiolla, vaikka tuote altistetaan sähkökentälle. Tämä havaittiin kaikissa mittauksissa, joten sen esittäminen on jätetty pois muista mittauksista. Tuotteen kiihtyvyyssanturin puolella on havaittavissa pieniä eroja kammioiden välillä, mutta tuotteiden ulostulo pysyy 20 mg:n sisällä toisistaan koko taajuusalueen yli. Y-suunnan deviaatioissa oleva hypähdys 1 MHz kohdalla johtuu siitä, että tuote mitataan useammasa erässä ja alkuarvot ovat olleet hieman erilaiset eri kerroilla mitatessa. Taajuuden 1 GHz jälkeen kiihtyvyyssarvot hieman hajaantuvat toisistaan, mutta ei merkittävästi.

Liitteessä 3 ovat tulokset, kun kammioita on vertailtu 90° orientaatioissa keskenään. Näissä tuloksissa näkyy muutamia kohtia, missä tuote on häiriintynyt eri tavalla kammioiden välillä. Alueella 40–60 MHz nähdään voimakkaita piikkejä molempiin suuntiin. Tällä taajuusalueella siis tuotteen ulostulo on vaihdellut kammioiden välillä.

Liitteessä 4 ovat tulokset, kun on vertailtu 0° ja 90° mittauksia, jotka on tehty IC Stripline -kammiolla. Tässä huomataan eroja, mikä on ihan oletettavaa. Tuote häiriintyy eri

tavalla riippuen sen orientaatiosta kammion sisällä. X- ja Y-suuntien kuvaajat ovat toistensa vastakohtat. Tämä tarkoittaa sitä, että 0° asennossa X-suunnan anturi ei ole häiriintynyt ja 90° asennossa Y-suunnan anturi ei ole häiriintynyt. Molemmissa tapauksissa siis samaan suuntaan ollut anturi on häiriintynyt. Sama ilmiö nähdään, kun on vertailtu TEM-kammion 0° ja 90° mittauksia liitteessä 5.

Liitteessä 6 on vertailtu 0° ja 180° tuloksia IC Stripline -kammiolla mitattuna. Tuotteen ulostulo on hyvin samankaltainen molemmilla mittauksilla. Mittaukset pysyvät 10 mg:n sisällä toisistaan. Syötettävässä tehossa nähdään eroavaisuuksia 2,5 GHz:n ja 4 GHz:n kohdilla. Tämä on hyvin linjassa saatujen VSWR-mittauksien suhteen kuvassa 15. Kun VSWR-arvo on korkeampi, niin kammioon syötetystä tehosta ei voi suoraan laskea kammiossa vallitsevaa sähkökenttää, koska osa tehosta heijastuu takaisin kammiosta huonon impedanssisovituksen takia.

Samanlaiset tulokset ovat nähtävissä myös liitteessä 8, jossa on vertailtu 0° ja 180° mittauksia vertailtu keskenään TEM-kammiolla. Tehon erokäyrä on erilainen kuin IC Stripline -kammiolla. Tämä johtuu siitä, että kammioden VSWR-arvot ovat erilaiset. TEM-kammion tulos on hyvin vertailtavissa kuvan 12 kanssa. Taajuuksilla 800–900 MHz TEM-kammion VSWR-arvo ylittää 1,25, ja tällöin nähdään kohinaa tehon erokäyrässä.

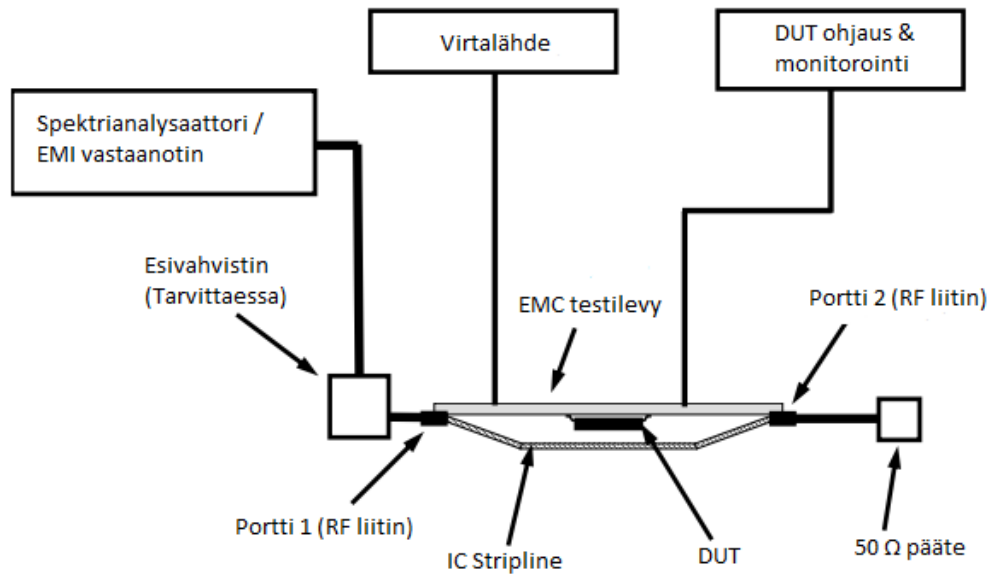
Näiden 0° ja 180° tulosten perusteella voisi olettaa, että 90° ja 270° vertailut tuottaisivat samanlaisia tuloksia. Liitteistä 8 ja 9 kuitenkin huomataan, että 90° ja 270° mittauksissa on enemmän eroja kuin 0° ja 180° mittauksissa. Tämä johtunee siitä, että kun tuote häiriintyy sähkökentästä, niin anturin ulostulo ei kasva tai vähene lineaarisesti vaan anturin mittaamaan kiihtyvyyteen syntyy enemmän kohinaa. Mitattaessa 0° tai 180° orientaatiossa tuote ei häiriköidy, niin erokäyrässä on hyvin vähän kohinaa.

5 Emissiotesti

Emissiotestillä mitataan, kuinka DUT säteilee RF-taajuuksista sähkömagneettista häiriötä ympäristöönsä. Standardi IEC-61967-1 määrittelee immuuteettitestejä yleisellä tasolla. IEC-61967-2 tarkentaa TEM-kammiolla tehtäviä testejä ja IEC-61967-8 IC Stripline -kammiolla tehtäviä. Työssä on pyritty tekemään mittaukset näiden standardien mukaan.

Emissiotestissä spektrianalysaattori kytketään suoraan kammioon ja kammion toiseen porttiin kytketään 50 Ω :n pääte. Vaihtoehtoisesti spektrianalysaattorille menevä signaali voidaan viedä 20–30 dB esivahvistimen kautta. Tämä madaltaa pohjakohinaa, sillä ulkoisella esivahvistimella saadaan parempi suorituskky kuin tässä käytetyn spektrianalysaattorin sisäisellä esivahvistimella.

Testilevy asetetaan mittakammioon ja levyyn kytketään tarvittavat virtakaapelit ja SPI-kommunikointikaapelit. Virta syötetään akustosta, jonka jännite reguloidaan sopivaksi. Reguloitu jännite menee vielä suodattimen kautta levyille, jolla estetään häiriön kytkeytymistä takaisin regulaattorille. Seuraavaksi käynnistetään testisovellus, joka suorittaa mittauksen. Testisovellus on tehty LabView'lla. Ensiksi tarkistetaan, että tuote kommunikoi tietokoneen kanssa oikein. Tämä tehdään tuotelevyä kääntelemällä ja katsomalla, muuttuuko tuotteen ulostulo sovelluksessa. Mittauskytkentä on havainnollistettu kuvassa 18.



Kuva 18. Emissiomittauskytkentä [1, s. 8].

Standardi IEC-61967-1 määrittelee spektrianalysaattorin mittausasetukset taulukon 3 mukaiseksi [8, s. 23–25].

Taulukko 3. Spektrianalysaattorin mittausasetukset [8, s. 23–25].

Taajuusalue	150 kHz–30 MHz	30 MHz–1GHz
Erotuskaistanleveys	10 kHz	100kHz
Videosuodatin	≥30 kHz	≥300 kHz

Videosuodattimen kaistanleveys tulisi pienimmillään olla kolme kertaa erotuskaistanleveys. Mitattavan tuotteen tuottaman häiriön ollessa kapeakaistaista ja mittauksen vaatiessa matalampaa kohinatasoa, niin standardi IEC-61967-1 sallii myös matalamman erotuskaistanleveyden käyttöä. Mikropiirien kello on yksi esimerkki kapeakaistaista häiriöstä. [8, s. 23–26.]

Standardi IEC-61967-1 ei ota kantaa, siihen minkä kokoisilla taajuusalueilla mittaus suoritetaan. Mittaukset suoritettiin 200 MHz:n pätkissä. Jokainen mitattu pätkä pyyhkäistiin vähintään kolme kertaa maksimipitoasetus päällä niin kuin standardi IEC-61967-1 suosittelee. LabView testisovellus ei aluksi mitannut korkeampia taajuuksia oikein. Spektrianalysaattori ei ollut ehtinyt pyyhkäistä edes yhtä kertaa, kun LabView komensi sen mittaamaan seuraavaa taajuusaluetta. Tästä johtuen testisovellus sai

väärän mittaustuloksen spektrianalysaattorilta. Tähän tehtiin korjaus, ja tämän jälkeen spektrianalysaattori ehti mitata jokaisen taajuuspätkän standardin IEC-61967-2 mukaisesti vähintään kolme kertaa.

Testisekvenssi aloitetaan, kun tuote on todettu toimivaksi. Ensiksi sekvenssi mittaa levyn yhdessä orientaatioissa, jonka jälkeen levyä käännetään 90° ja toistetaan mittaus. Näin tehdään, kunnes jokainen orientaatio on mitattu taajuusalueen yli. Tämän jälkeen täytyy vielä mitata ympäristön häiriötaso. Tätä varten tehdään vielä yksi mittaus, mutta tällä kertaa tuotteesta otetaan sähköt pois. Näin tuloksia käsitellessä voidaan laskea, mikä on ympäristön tuottamaa häiriötä ja mikä on mitattavan tuotteen tuottamaa häiriötä. Jos alueen ympäristön häiriötasoa ei tunneta hyvin, kannattaa ympäristön häiriötasoa mitata tunnin ajan maksimipitoasetus päällä. Näin saamme myös mitattua paikalliset satunnaiset RF-häiriöt. Emissio mittauksia voidaan pitää luotettavina vain, kun mitattavan tuotteen häiriötaso on 6 dB korkeammalla kuin ympäristön häiriötaso [8, s. 29].

IC Stripline -kammio

Standardissa IEC-61967-8 määritellään lisäykset IEC-61967-1 standardiin, kun mittaukset tehdään IC Stripline -kammiolla. IEC-61967-8 laajentaa mitattavan taajuuden 3 GHz:n asti. Spektrianalysaattorin erotuskaistanleveys tälle laajennetulle kaistanleveydelle pysyy siinä, mitä standardi IEC-61967-1 määrittelee 30 MHz–1 GHz:n taajuusalueelle. Kammion VSWR-arvo tulisi olla alle 1,25 mitattavan taajuusalueen yli. Vaikka standardi on määritelty vain 150 kHz–3 GHz:n alueelle, niin mittaukset suoritettiin laajennetulla 10 kHz–4.2 GHz:n alueelle.

TEM-kammio

Standardissa IEC-61967-2 määritellään lisäykset IEC-61967-1 standardiin, kun mittaukset tehdään TEM-kammiolla. Kammion VSWR-arvo tulisi olla alle 1,5 mitattavan taajuusalueen yli. Vaikka standardi on määritelty vain 150 kHz–1 GHz:n alueelle, niin mittaukset suoritettiin laajennetulla 10 kHz–3 GHz:n alueella.

5.1 Tulokset

Mittaukset suoritettiin kolmelle eri tuotteelle ja kahdella eri tuotteen suodinasetuksella. Tuloksissa on esitetty ainoastaan yksi tuote, vaikka työssä mitattiin kolme tuotetta. Tämä johtuu siitä, että tulokset eivät merkittävästi eronneet toisistaan eri tuotteiden välillä. Esitetyistä tuloksista on vähennetty ympäristön häiriötaso. Jotta kammioita voisi verrata keskenään, on IC Stripline -kammion tulokseen lisättävä korjauskerroin [1, s. 15]. Tämä korjauskerroin täytyy ottaa huomioon, koska kammioden septumit ovat eri etäisyyksillä mitattavasta tuotteesta. Näin ollen lähempänä oleva septum mittaa suuremman arvon. Tämä korjauskerroin lasketaan kaavalla (7) [1, s. 15].

$$A = B + 20 * \lg\left(\frac{h_{IC \text{ Stripline}}}{h_{\mu TEM}}\right) \quad (7)$$

A on korjauskertoimella korjattu tulos [dBuV]

B on mitattu tulos [dBuV]

$h_{\mu TEM}$ on TEM-kammion septumin korkeus [m]

$h_{IC \text{ Stripline}}$ on IC Stripline -kammion korkeus [m]

Työssä käytettyjen kammioden septumien korkeudet olivat: TEM-kammio 43 mm ja IC Stripline -kammio 8 mm, jolloin korjauskertoimeksi saadaan -14,6 dB.

Liitteistä 10 ja 11 nähdään TEM- ja IC Stripline -kammioden emissiomittaustulokset. Verrattaessa samalla kammiolla saatuja 0° ja 180° orientaatioissa mitattuja tuloksia niin huomataan, että ne ovat lähes samanlaiset. Sama nähdään myös, kun verrataan 90° ja 270° orientaatioissa mitattuja arvoja. Kuitenkin, kun verataan 0° ja 90° orientaatioissa mitattuja arvoja, niin saadaan erilaiset tulokset. Tämän perusteella 180° ja 270° orientaation mittaukset voisi jättää mittaamatta, koska ne ovat käytännössä samat mitä 0° ja 90° orientaatioissa mitattuna.

Tuloksissa näkyy voimakkaita piikkejä 433 MHz:n ja 1,95 GHz:n kohdilla. Nämä eivät todennäköisesti ole tuotteen aiheuttamaa häiriötä vaan ympäristöstä mitattuja. Taajuus 433 MHz kuuluu ISM-taajuusalueille [9, s. 93]. ISM-taajuusalue (Industrial, Scientific and Medical) on maailmanlaajuinen radiotaajuuskaista, joka on vapaasti käytettävissä ilman lupaa. Taajuus 1,95 GHz on matkapuhelinverkon taajuus [10, s. 362]. Näillä taajuuksilla ei ole koko ajan tehoa, eivätkä nämä ole näkyneet taustakohinaa mitattaessa. Taajuuksilla on kuitenkin ollut liikennettä samaan aikaan, kun tuotetta on mitattu. Nämä

purskemaiset taustakohinat saataisiin mitattua paremmin, jos taustakohinaa oltaisiin mitattu pidempään.

Orientaatioilla 90° ja 270° näkyy 50 MHz:n kohdalla ja sen ympäristössä hyvin ka-peakistaista häiriötä. Tämä on luultavasti mitatun tuotteen sisäinen kellosignaali. Molemmilla kammioilla kaikissa mittaussuunnissa on 0,8–0,9 MHz taajuuksilla havaittavissa häiriöitä, jotka ylittävät 6 dBuV:n arvon. Tämä on mahdollisesti SPI-kommunikaatiosta johtuvaa. Testissä käytettiin 1 MHz:n SPI-kommunikaationopeutta.

Verratessa TEM- ja IC Stripline -kammioiden välisiä tuloksia huomataan, että IC Stripline -kammiolla pohjakohina on alle 0 dBuV. Tämä johtuu käytetystä -14,6 dB korjauskertoimesta. TEM-kammiolla on nähtävissä 65 kHz:n ja 95 kHz:n kohdilla häiriötä, mitä ei IC Stripline -kammiolla näy.

6 Yhteenveto

Insinööriytyössä oli tavoitteena selvittää, soveltuuko uusi IC Stripline -kammio testimetodina komponenttien validointiin kuten nykyisin käytössä oleva TEM-kammio. Tämä tehtiin mittaamalla kolmea eri anturia kummallakin kammiolla. Anturit mitattiin monella eri asetuksella ja orientaatiolla. Antureista mitattiin immunitaetti sekä emissio. Kammiota myös analysoitiin mittaamalla niiden VSWR-arvo, joka kertoo kammion impedanssisovituksen ominaisuudet. Mittaukset pyrittiin tekemään standardien IEC-62132-1, IEC-62132-2, IEC-62132-8, IEC-61967-1, IEC-61967-2 ja IEC-61967-8 mukaan.

Aluksi mitattiin kammioiden VSWR-arvot. Näissä havaittiin eroavaisuuksia kammioiden välillä, varsinkin jos IC Stripline -kammion sisällä oli mitattava tuote. Tämä johtui siitä, että testattava tuote oli hieman liian korkea kyseiseen kammioon. VSWR-mittauksen perusteella IC Stripline -kammion tuloksia ei voida pitää luotettavina 2 GHz:n jälkeen, kun mitataan näin korkeaa komponenttia. TEM-kammiolla havaittiin myös hieman liian korkea VSWR-arvo 800 MHz:n ja 1,8 GHz:n tuntumassa. Näillä taajuuksilla on havaittu aikaisemmin tuotteen häiriintymistä. Syynä on luultavasti ollut juuri tämä liian korkea VSWR-arvo. Jotta voitaisiin olla varmoja kammioihin syntyneen kentänvoimakkuuden suuruudesta ja tasaisuudesta taajuusalueen yli, tulisi tehdä sopivat antennit, joilla voidaan mitata kentänvoimakkuus. Tähän löytyy ohje standardista IEC-62132-2, mutta tätä mittausta ei ehditty tekemään tämän insinööriytyön osana.

Testilevy, millä testattava tuote kytketään kammioon, ei ollut aivan standardin IEC-62132-1 mukainen. Kun seuraavaa testilevyä suunnitellaan, tulisi ottaa huomioon varsinkin läpivientien sijainnit ja halkaisijat. Vaikka testilevy ei ollut aivan standardin mukainen, sen ei pitäisi vaikuttaa merkittävästi tuloksiin.

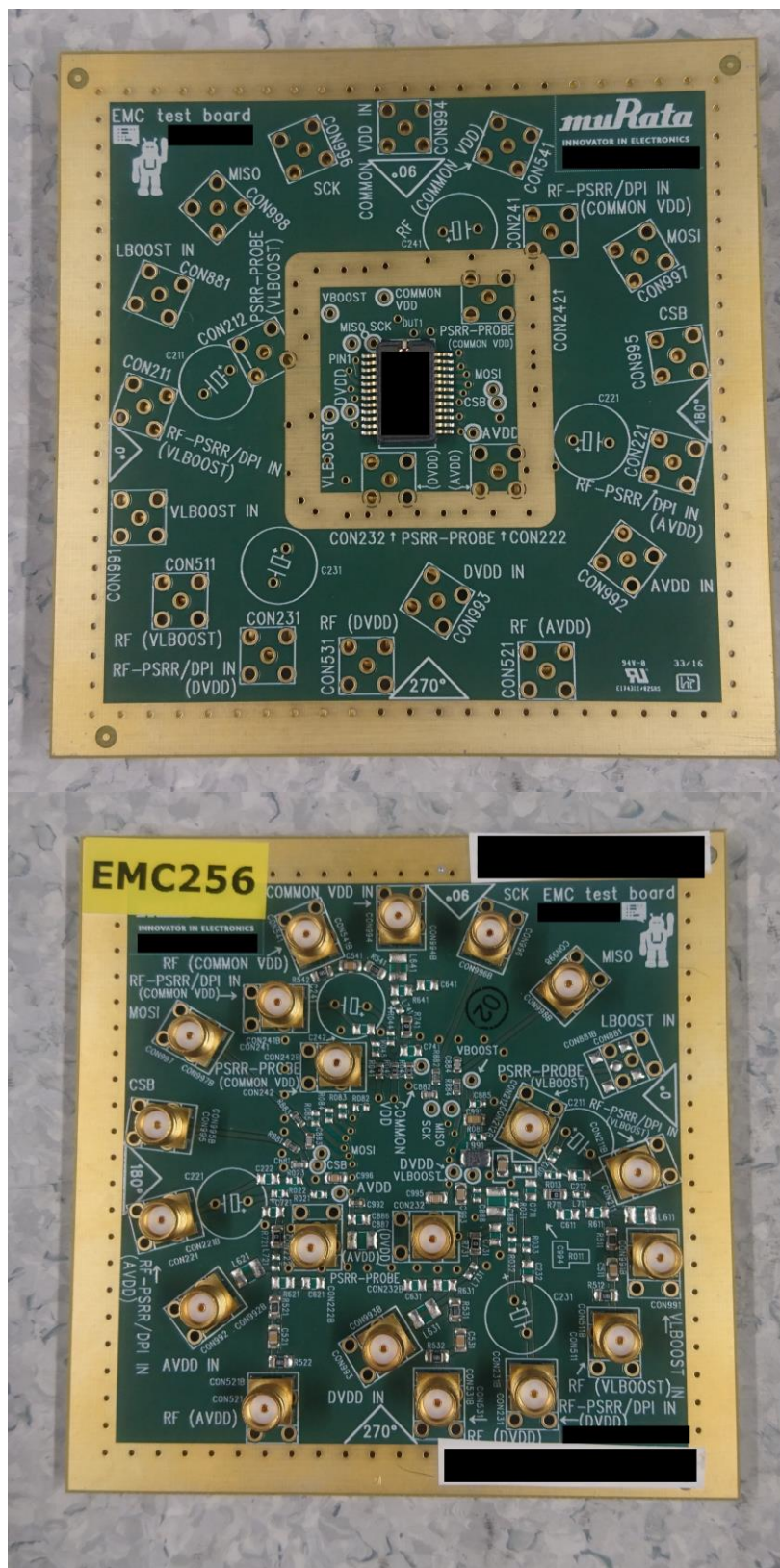
Testattavien tuotteiden immunitaetti- ja emissiomittaukset suoritettiin onnistuneesti. Emissiomittauksen testisovelluksessa havaittiin kriittinen virhe, joka korjattiin. Tuloksia vertailemalla ei havaittu merkittäviä eroja kammioiden välillä. Näiden mittausten tueksi olisi hyvä mitata, miten tulos vaihtelee, jos toistaa saman mittauksen useaan kertaan. Näin saataisiin selvitettyä, minkä suuruinen kohina on normaalia mittauksen aikana.

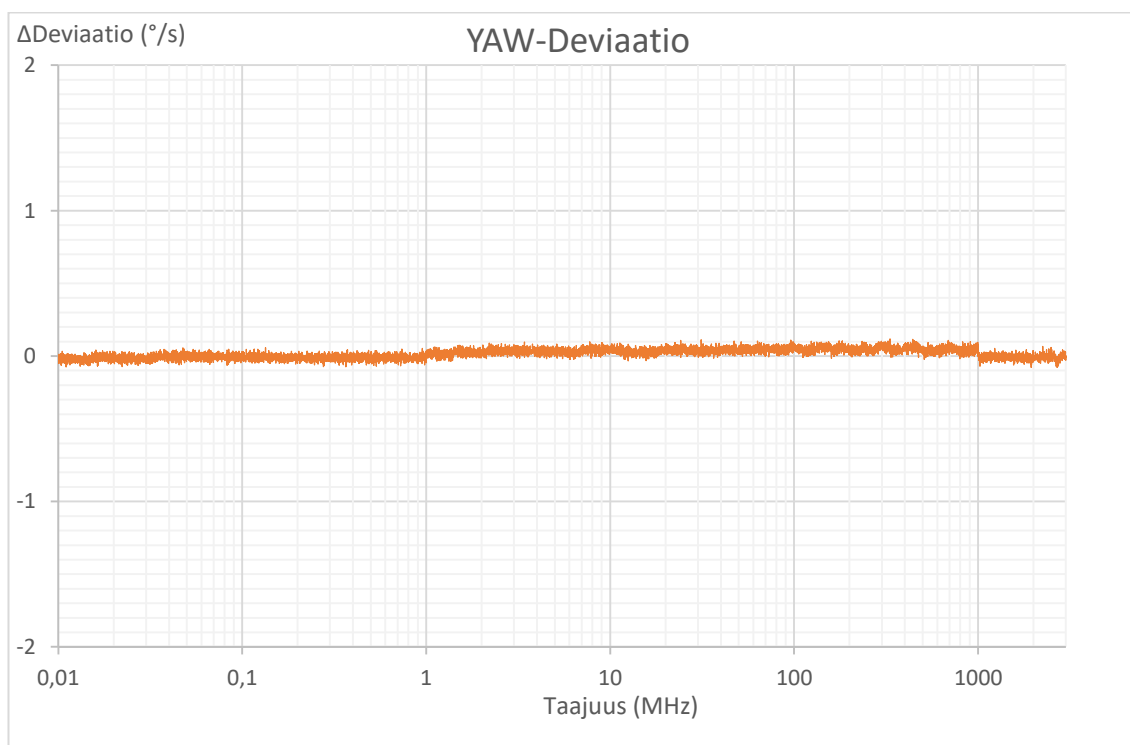
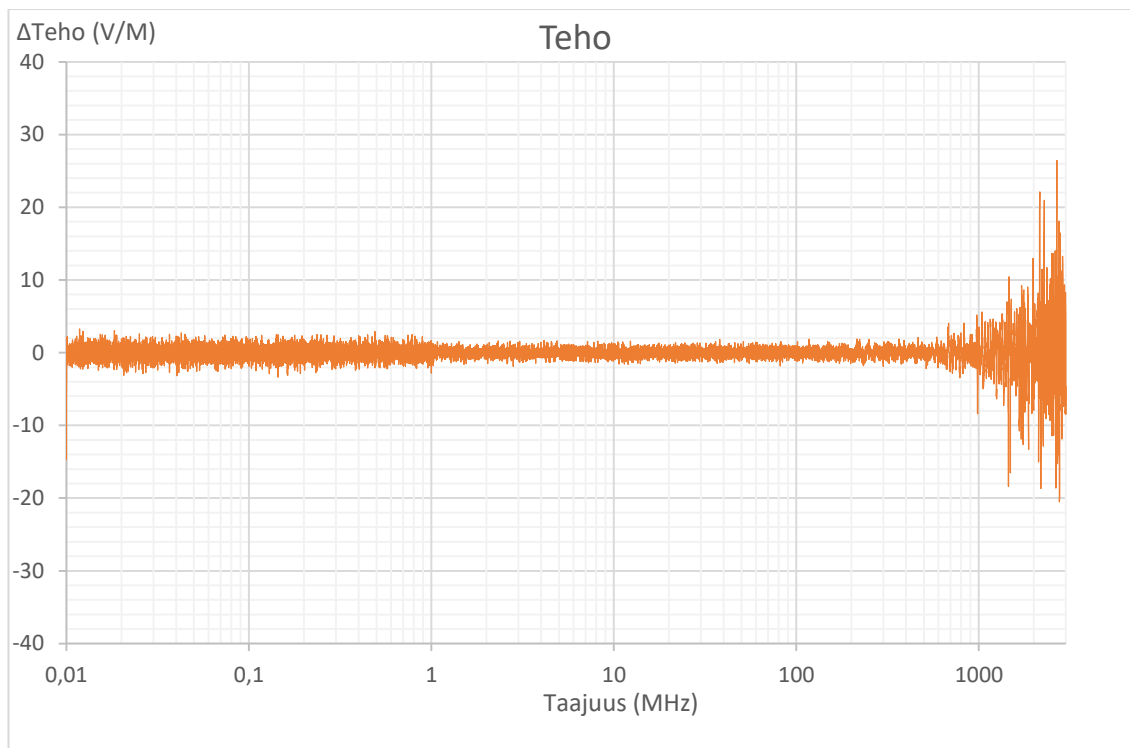
IC Stripline -kammio soveltuu komponenttien validointiin kuten nykyinen TEM-kammio. IC Stripline -kammiolle täytyy tehdä lisämittauksia, jos sitä halutaan käyttää yli 2 GHz:n taajuuksilla.

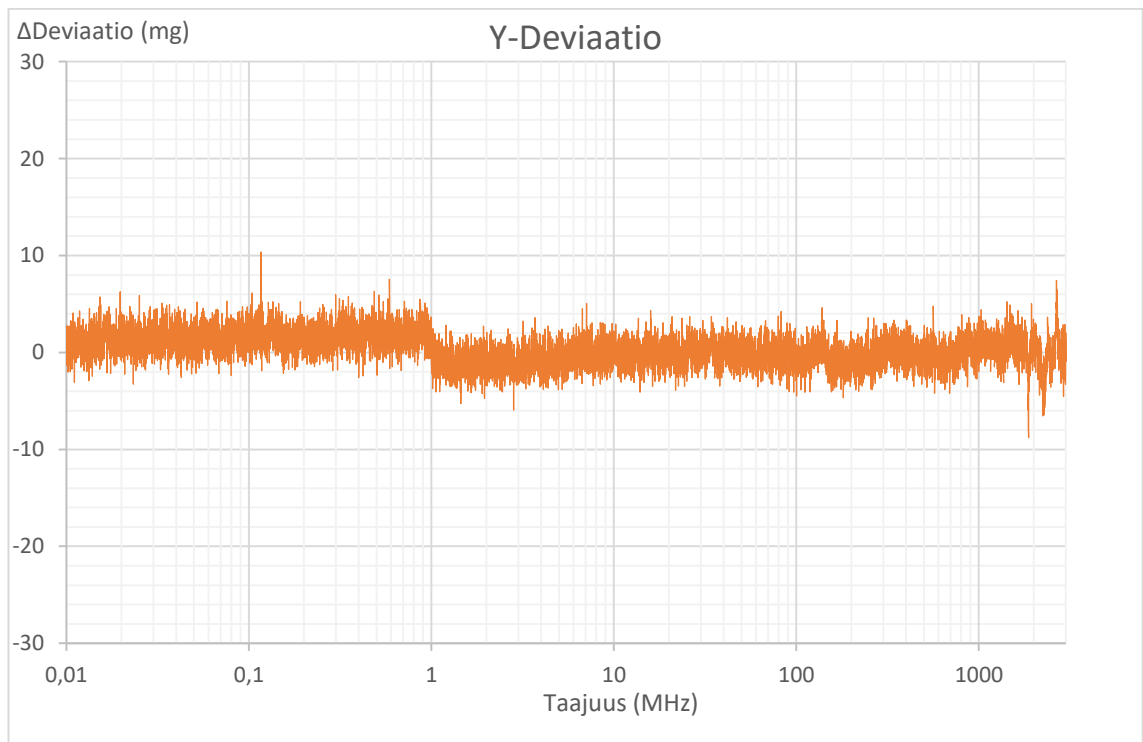
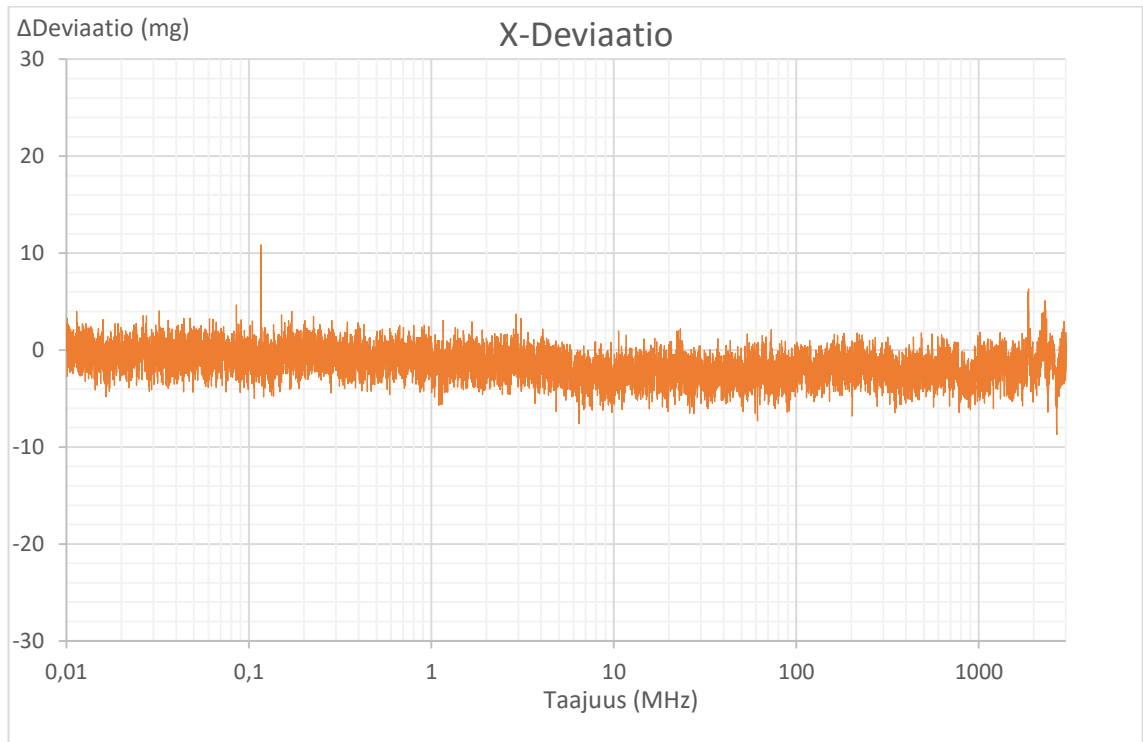
Lähteet

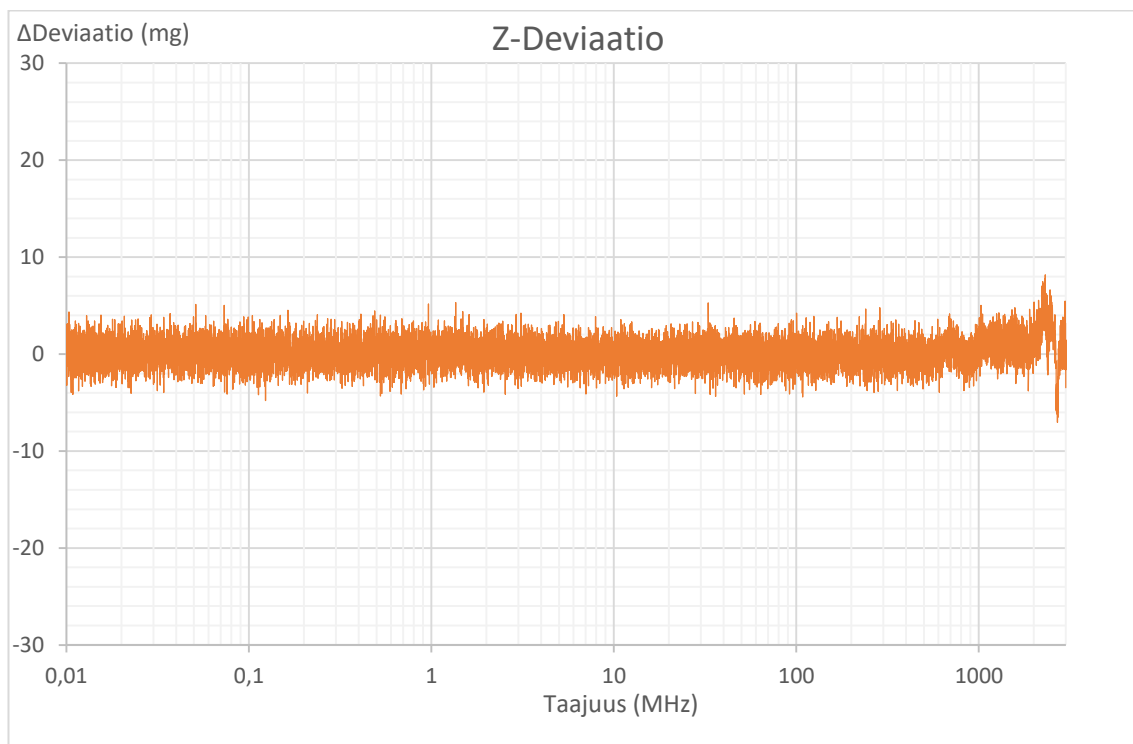
1. IEC 61967-8: Integrated circuits – Measurement of electromagnetic emissions – Part 8: Measurement of radiated emissions – IC stripline method. 2011. Switzerland. International Electrotechnical Commission.
2. IEC 62132-8: Integrated circuits – Measurement of electromagnetic immunity – Part 8: Measurement of radiated immunity – IC stripline method. 2012. Switzerland. International Electrotechnical Commission.
3. Rajamäki, Jyri. 6/2000. EMC-direktiivin ensimmäiset kymmenen vuotta Suomessa. Verkkodokumentti <<http://www.tukes.fi/Tiedostot/julkaisut/6-2000.pdf>>. Luettu 24.7.2016.
4. IEC 62132-1: Integrated circuits – Measurement of electromagnetic immunity, 150 kHz to 1 GHz – Part 1: General conditions and definitions. 2006. Switzerland. International Electrotechnical Commission.
5. Henry W. Ott, 2009. Electromagnetic Compatibility Engineering. New Jersey: Wiley.
6. Häkkinen, Esa, Fallström, Kim, Haapalinna, Atte & Kärhä, Petri. 1999. Häiriöt mittauksissa. Verkkodokumentti. <<http://metrology.hut.fi/courses/s108-180/haimit.pdf>>. Luettu 1.3.2017.
7. Williams, Tim. 2007. EMC for Product Designers fourth edition. Great Britain: Newnes.
8. IEC 61967-1: Integrated circuits – Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz – Part 1: General conditions and definitions. 2002. Switzerland. International Electrotechnical Commission.
9. Viestintävirasto. 1/2018. Taajuusjakotaulukko. Verkkodokumentti <https://www.viestintavirasto.fi/attachments/maaraykset/Taajuusjakotaulukko_suomi_3.1.2018.pdf>. Luettu 7.5.2018
10. Kari Jokela, Leena Korpinen, Maila Hietanen, Lauri Puranen, Laura Huurto, Harri Pättikangas, Tim Toivo, Ari-Pekka Sihvonen, Heidi Nyberg. Säteilylähteet ja altistuminen. Verkkodokumentti. <http://www.stuk.fi/documents/12547/494524/6_9.pdf/d583d48c-c914-4593-a7bc-4d0e93415f85>. Luettu 7.5.2018

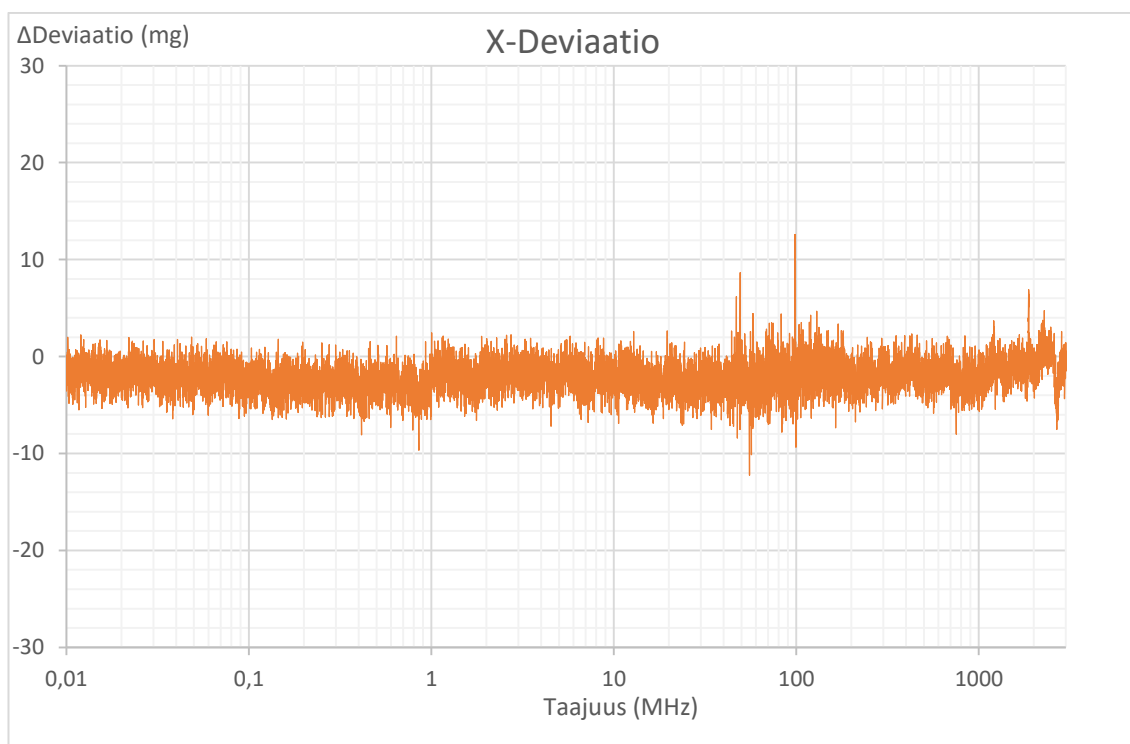
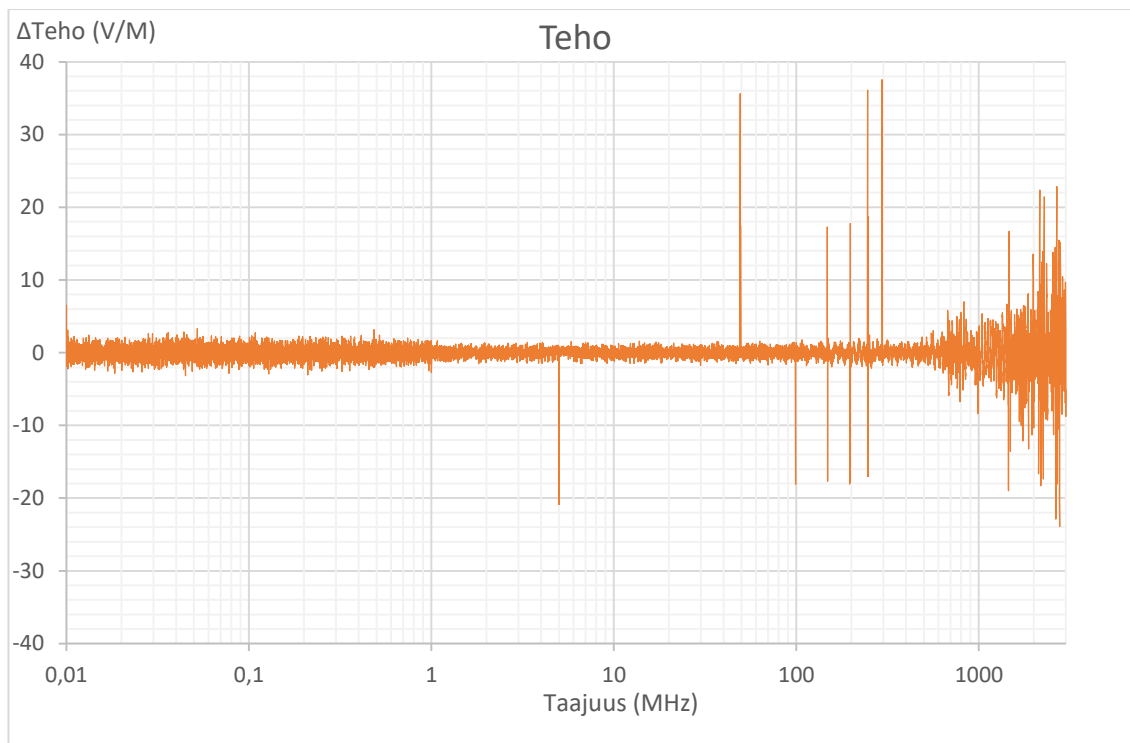
Kuva testilevystä

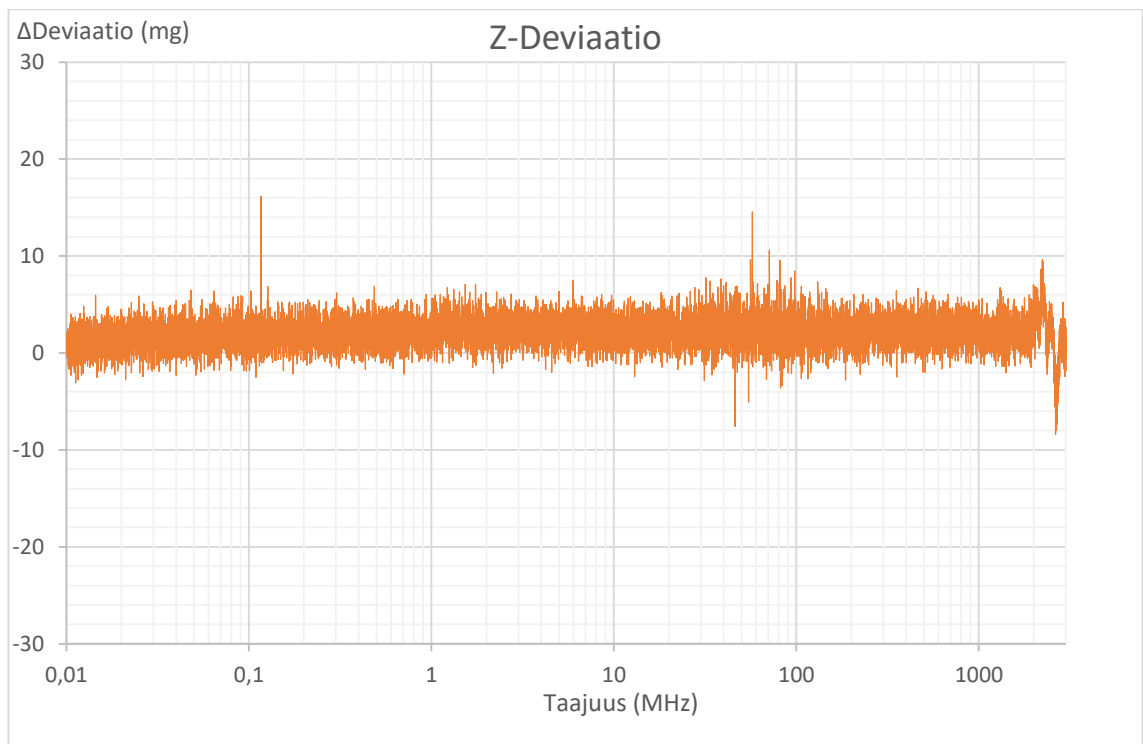
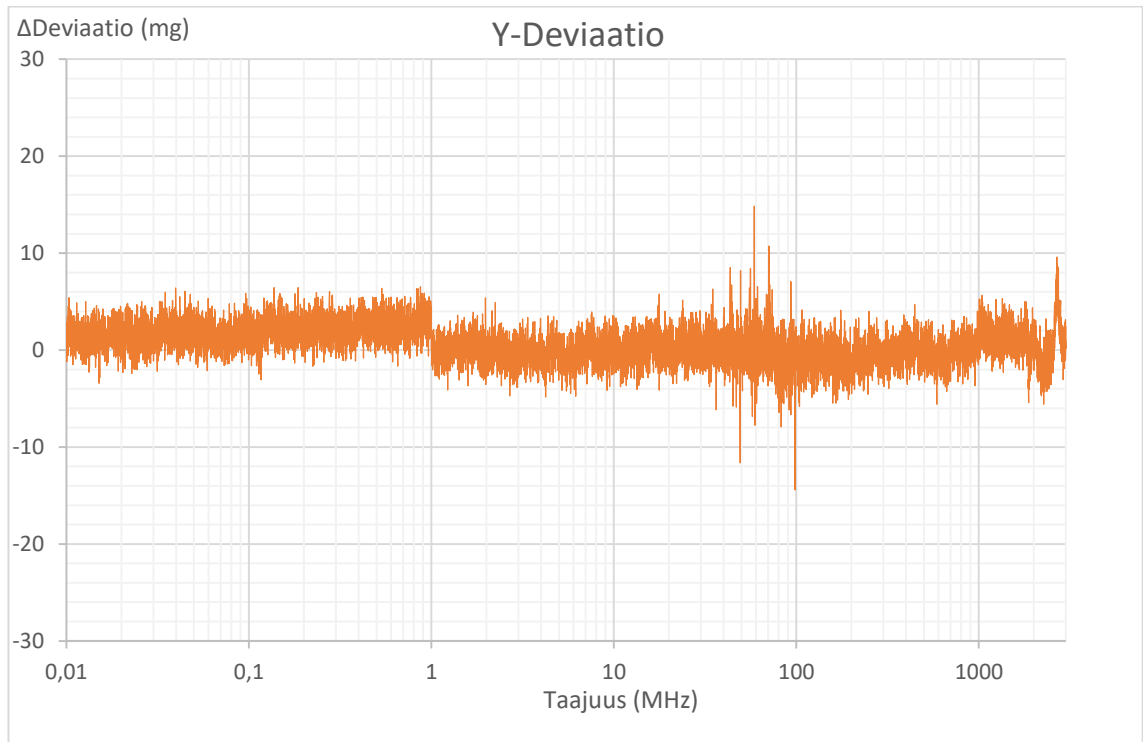


Testattava tuote 1 immuniteettimittaustulokset 0° TEM vs. 0° IC Stripline

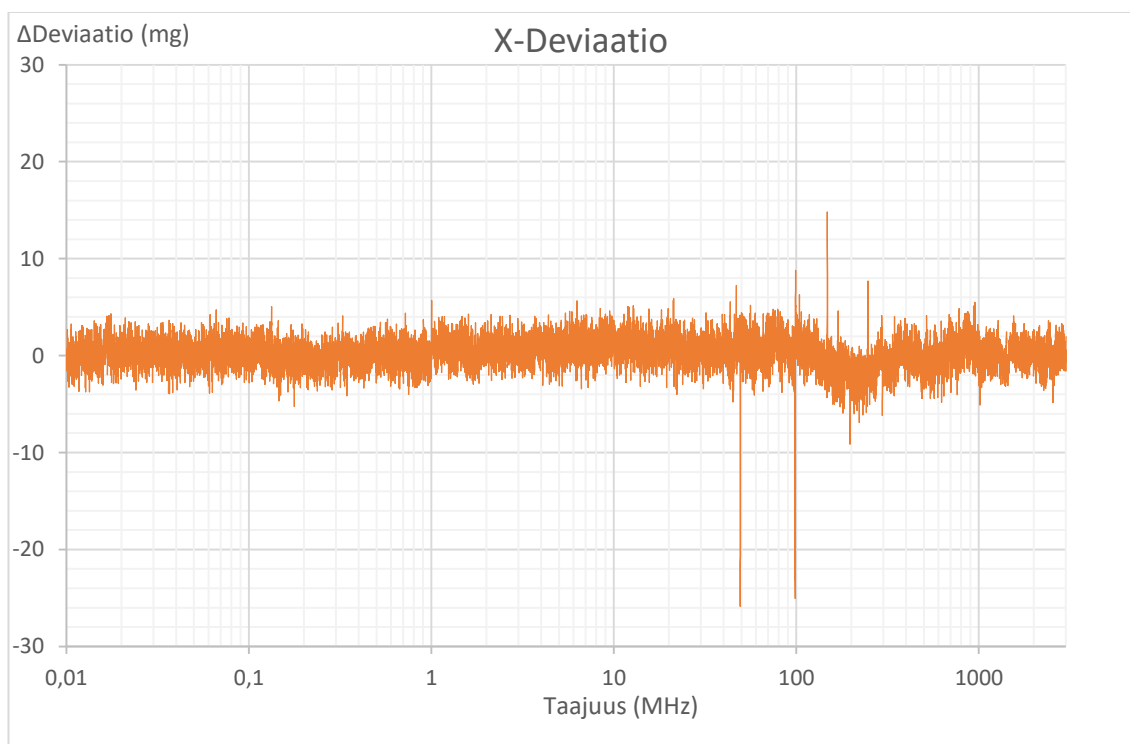
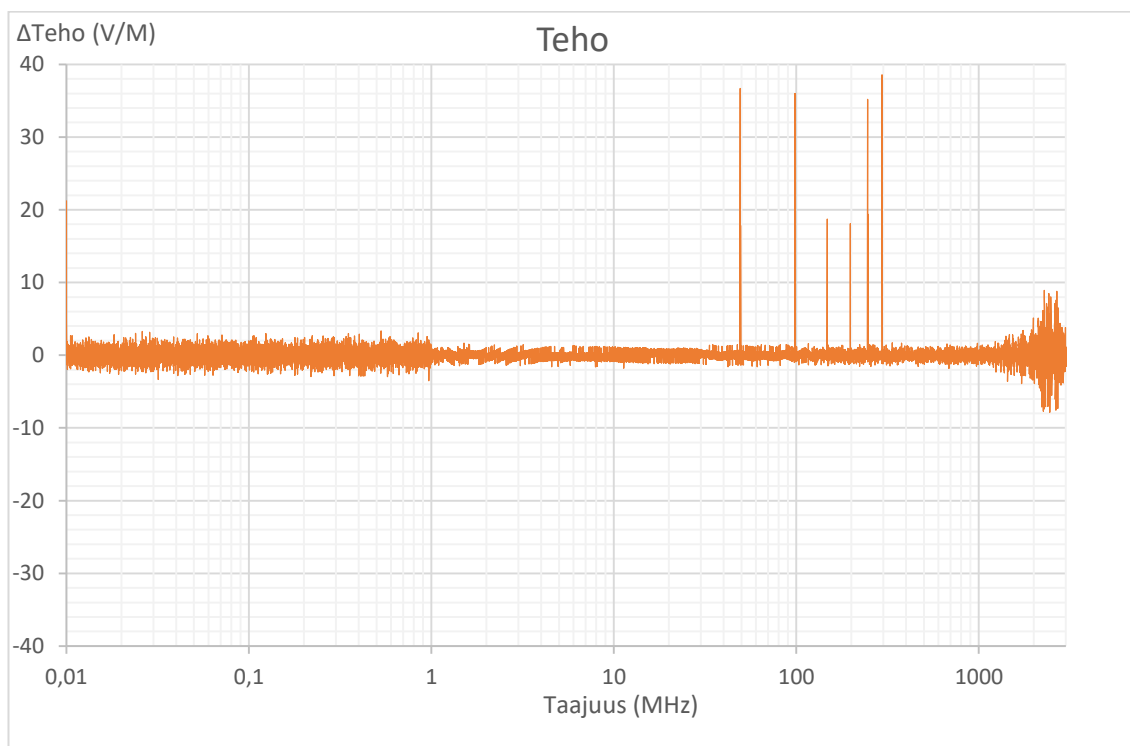


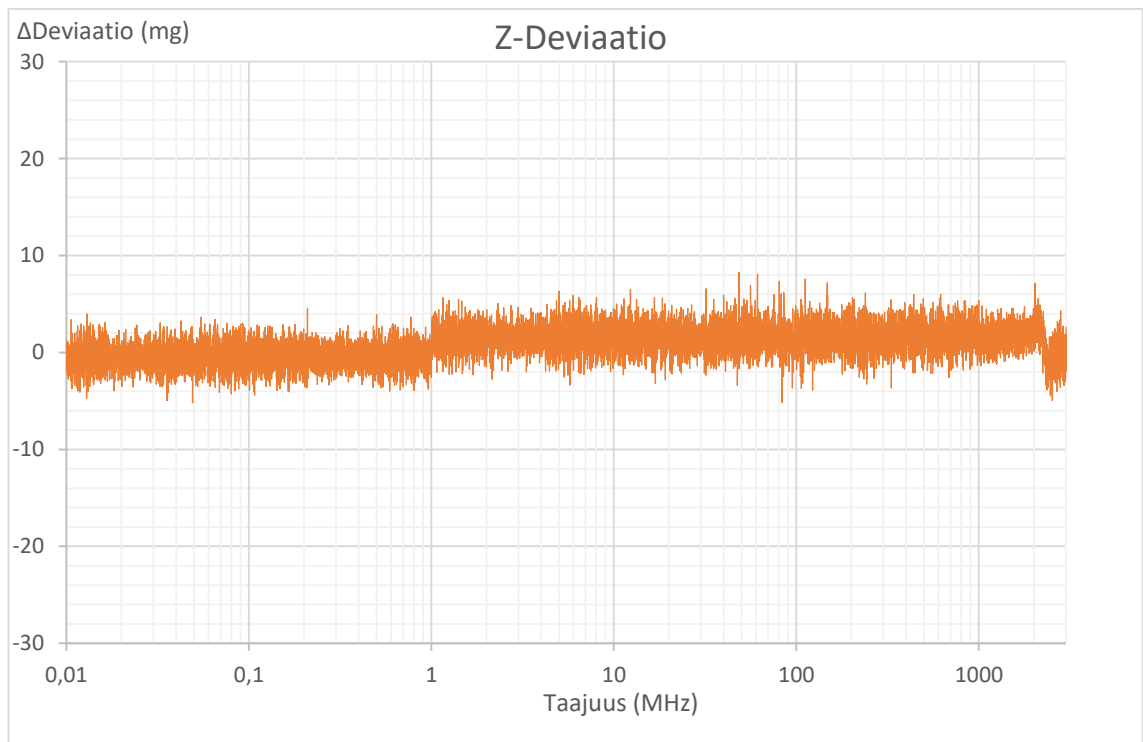
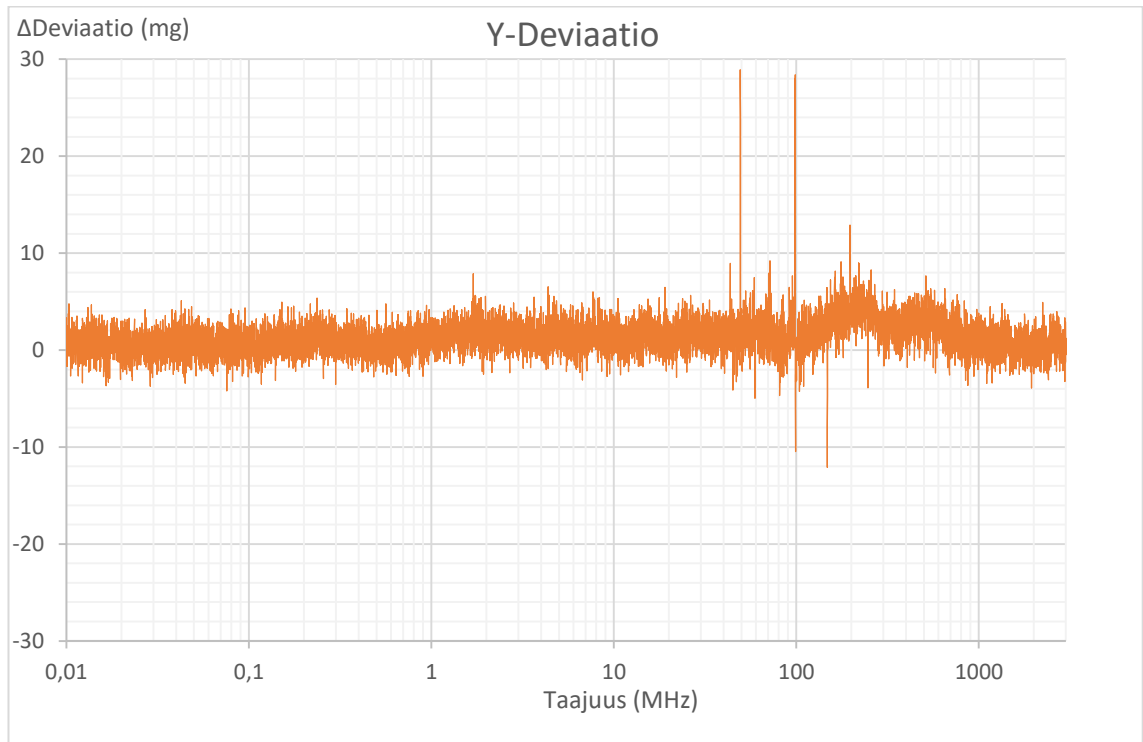


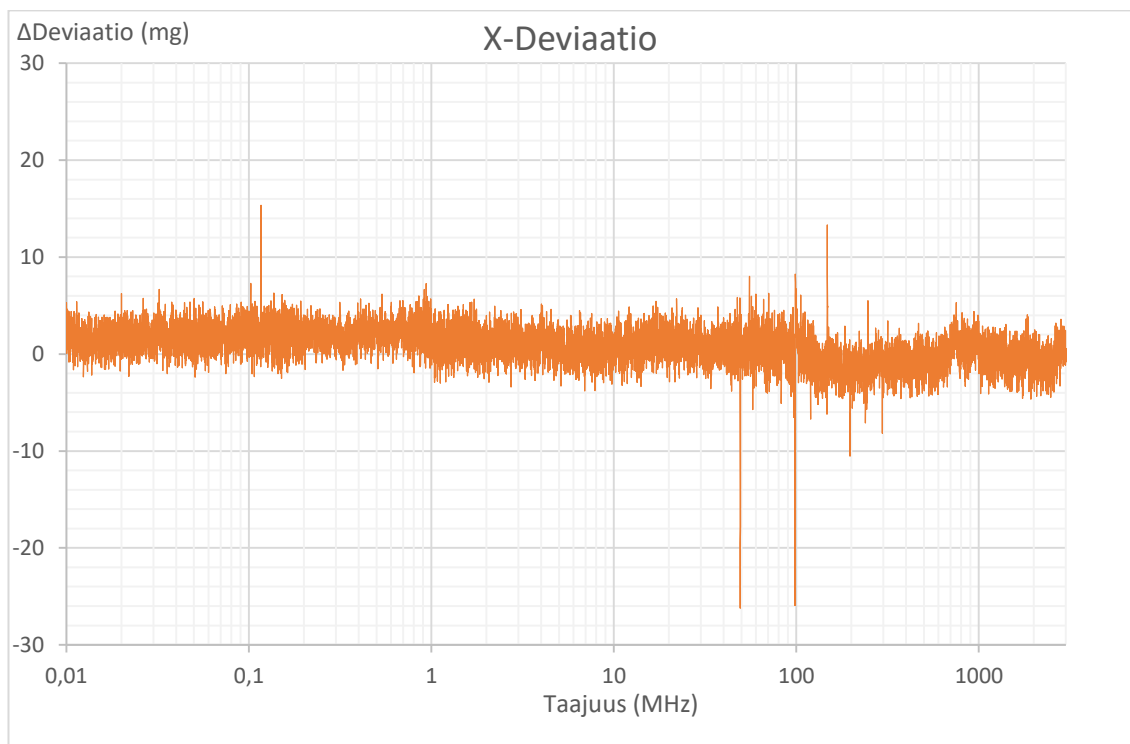
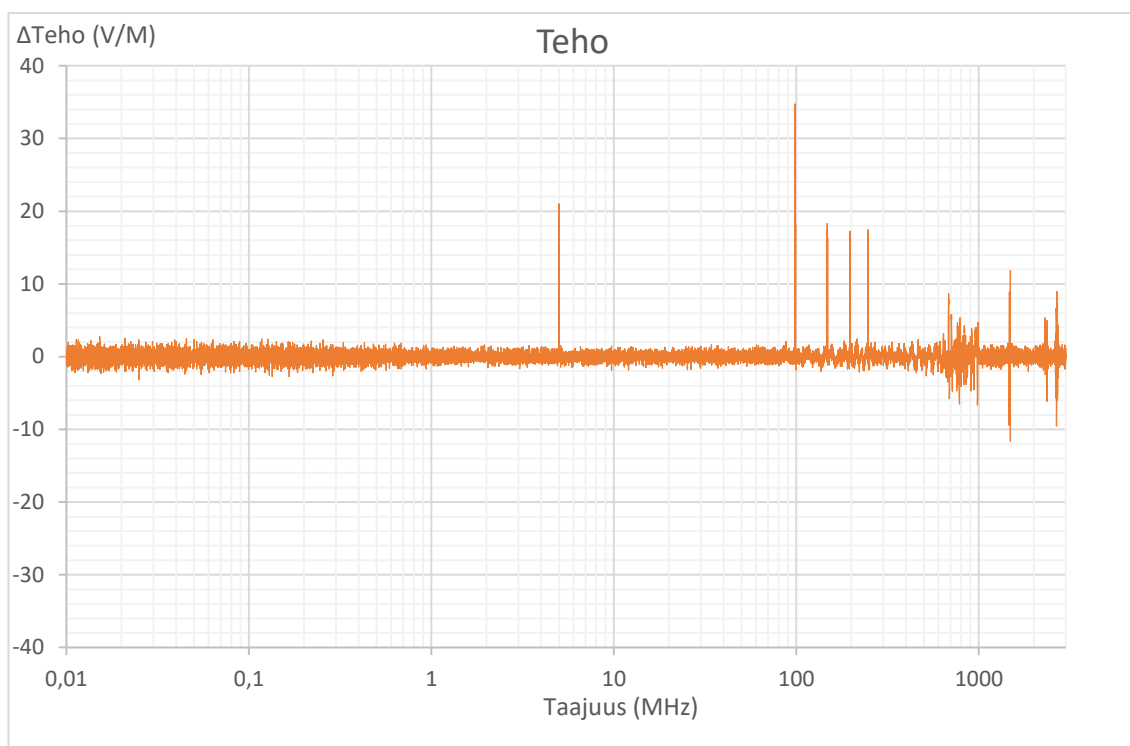
Testattava tuote 1 immuniteettimittaukset 90° TEM vs. 90° IC Stripline

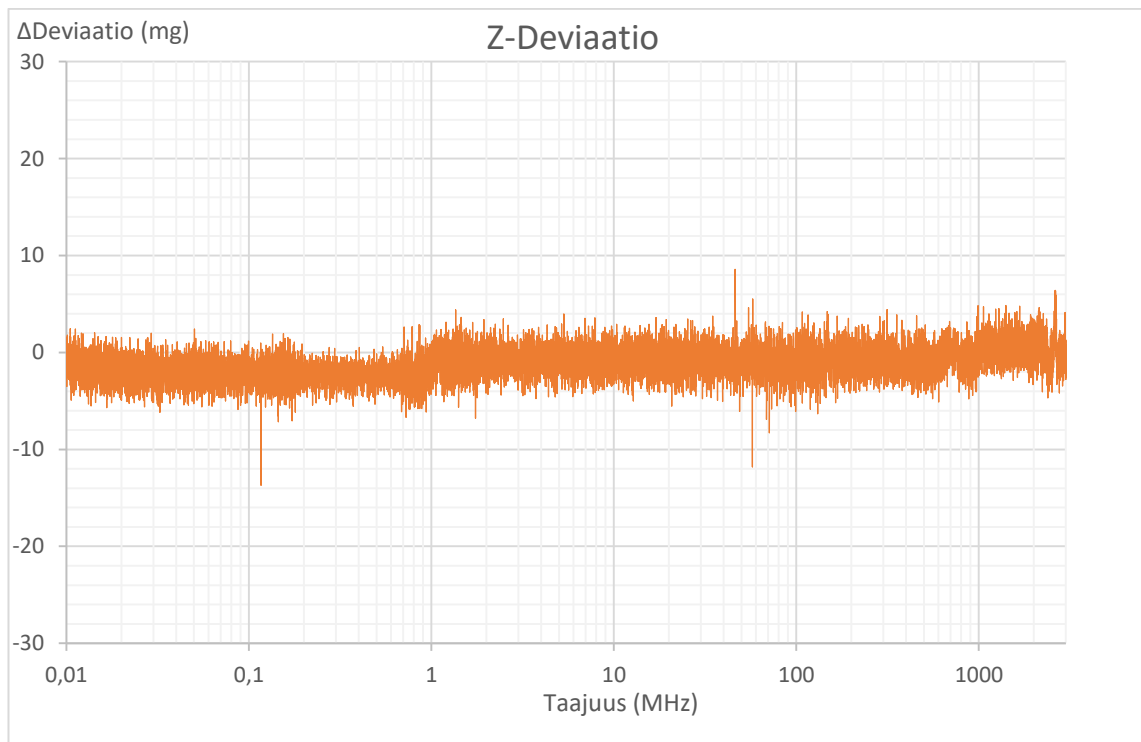
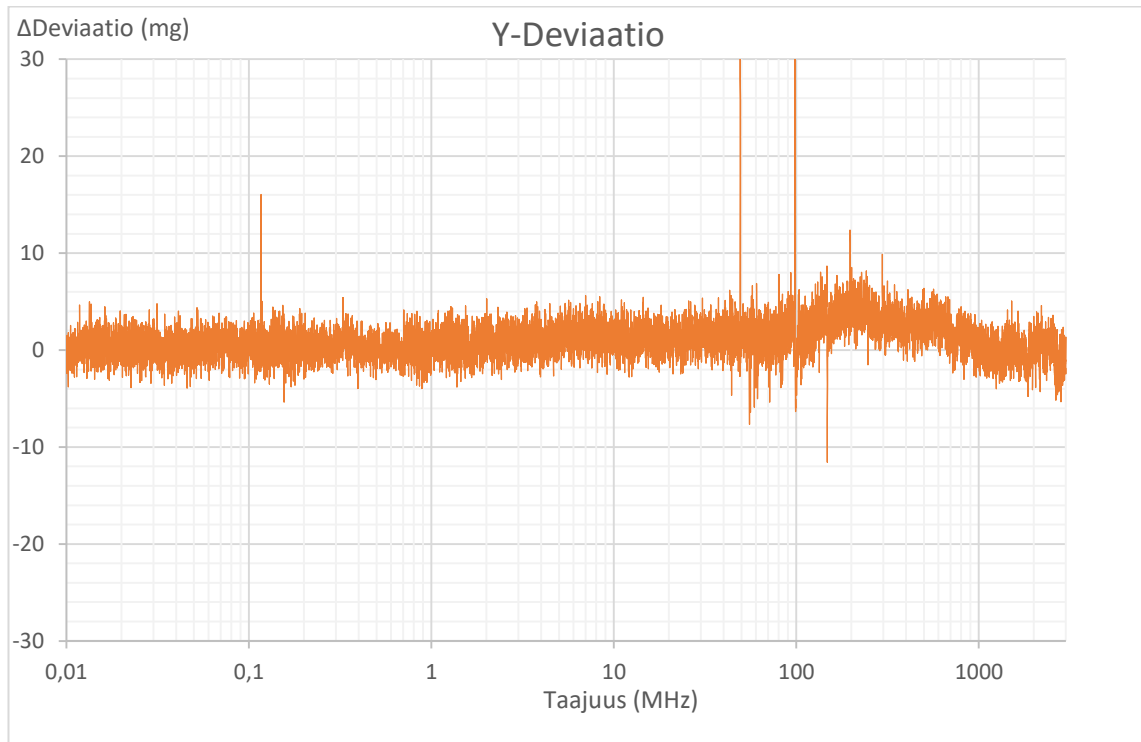


Testattava tuote 1 immunitaettimittaustulokset 0° IC Stripline vs. 90° IC Stripline

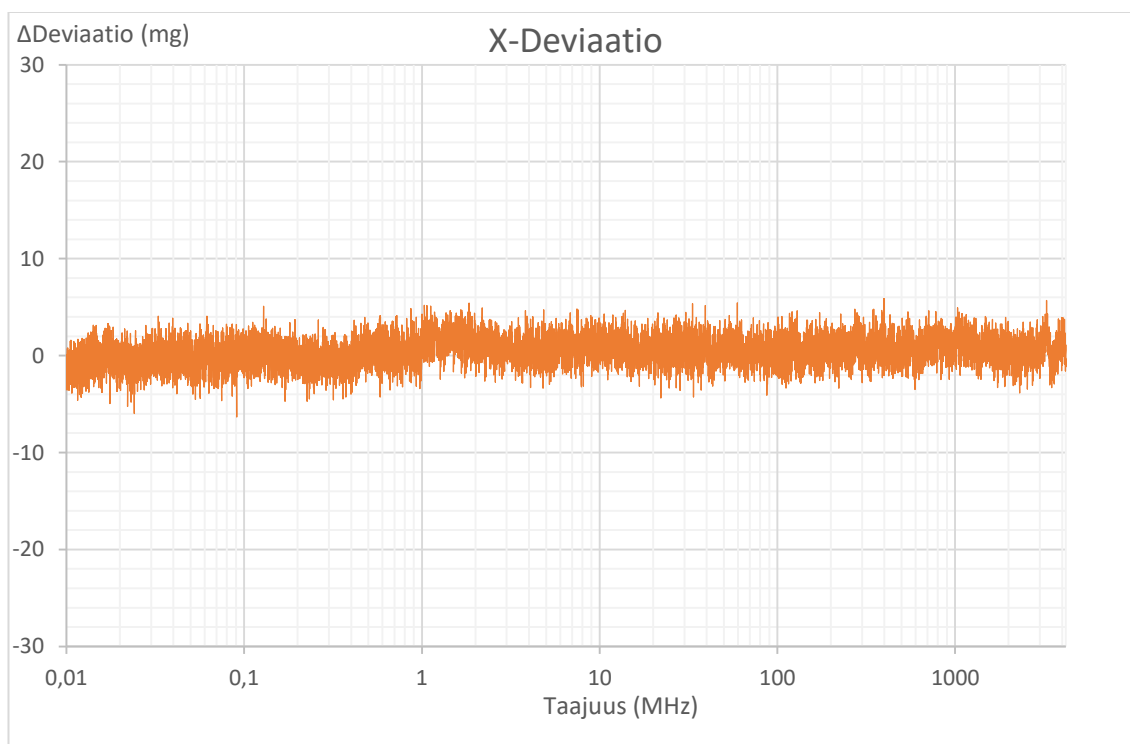
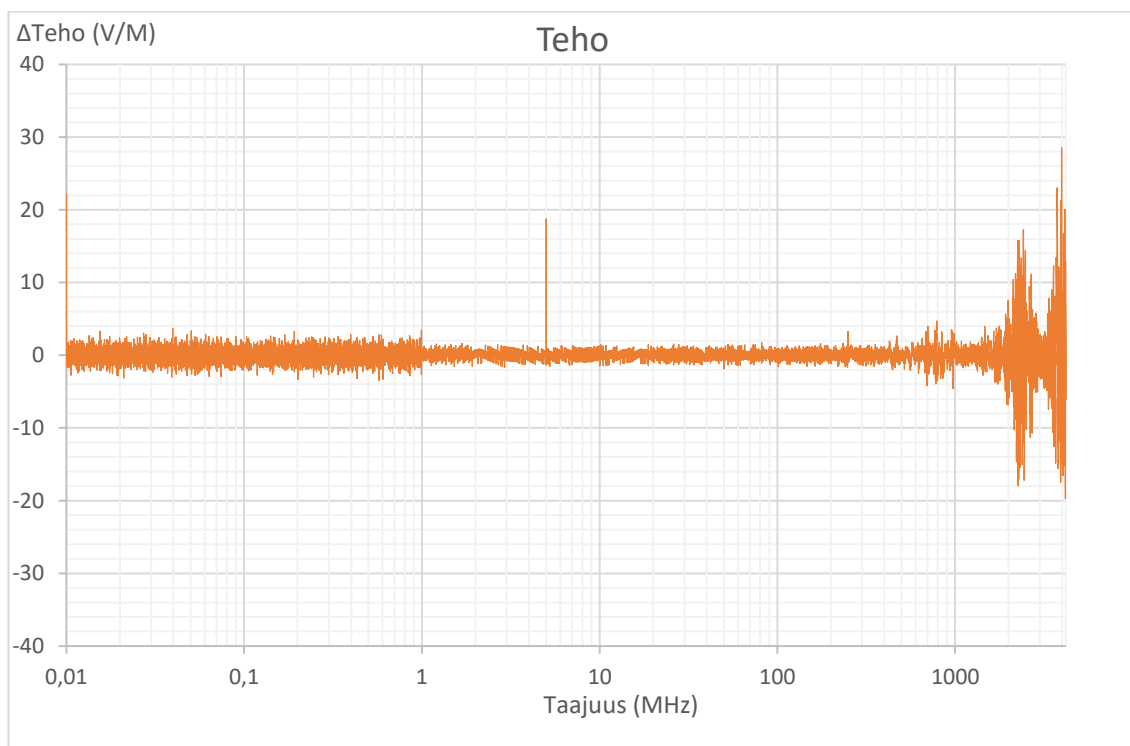


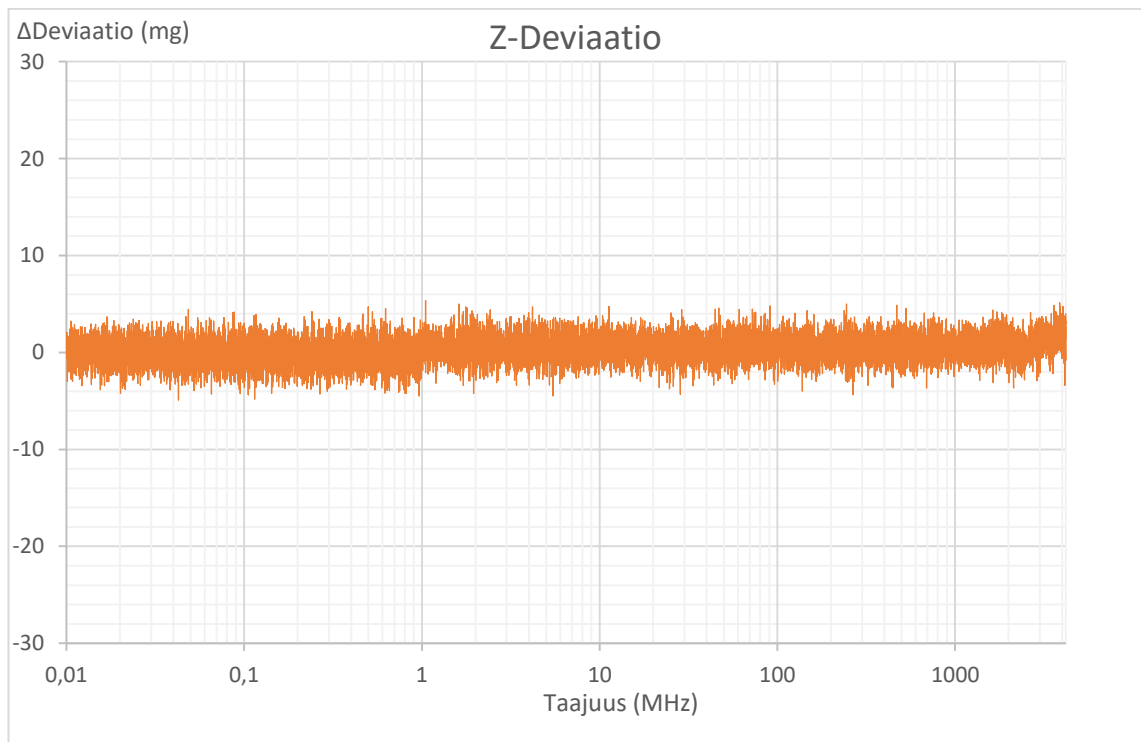
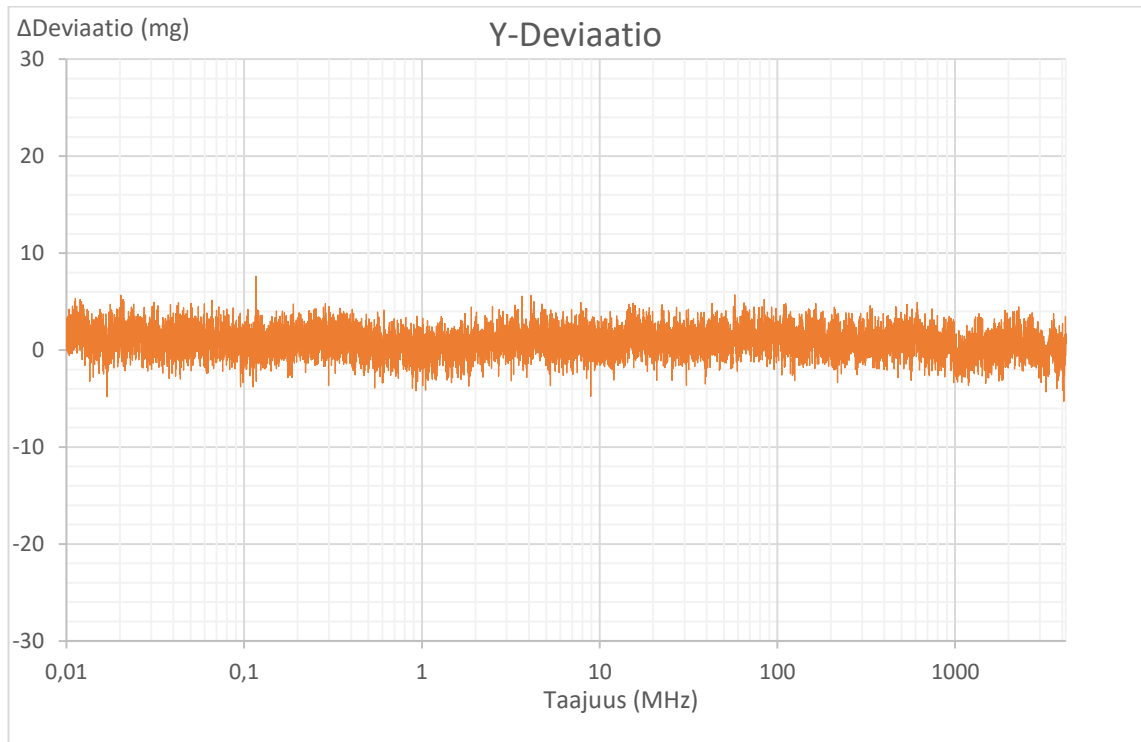


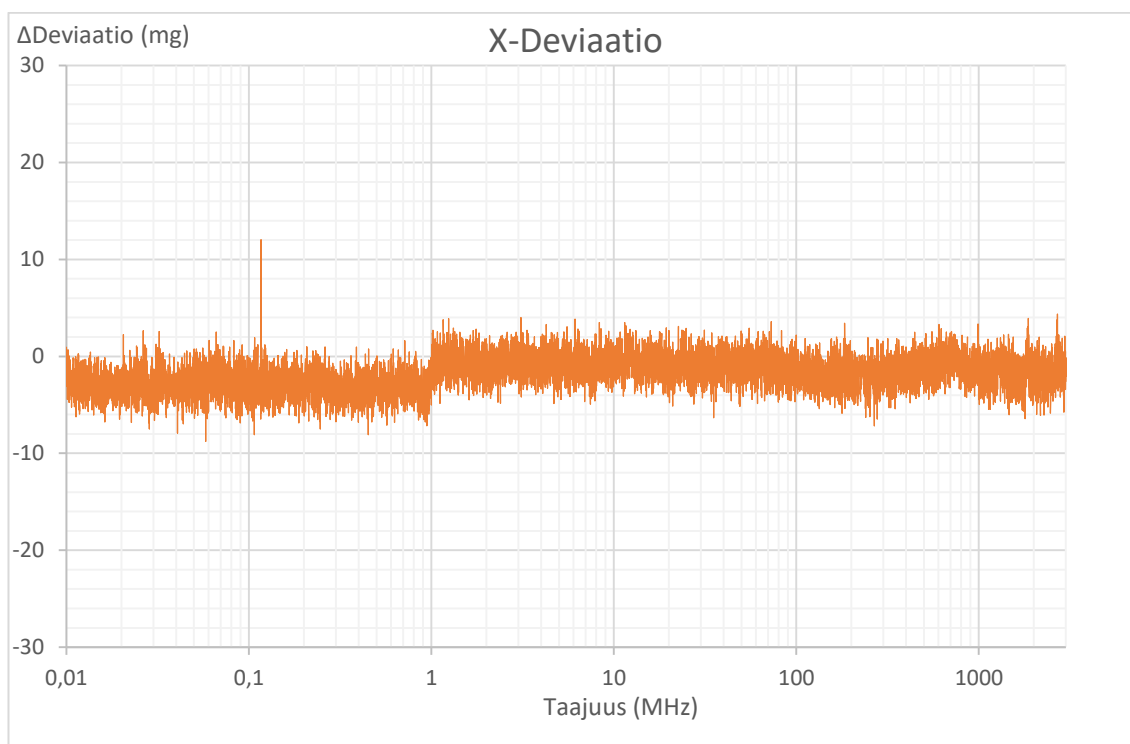
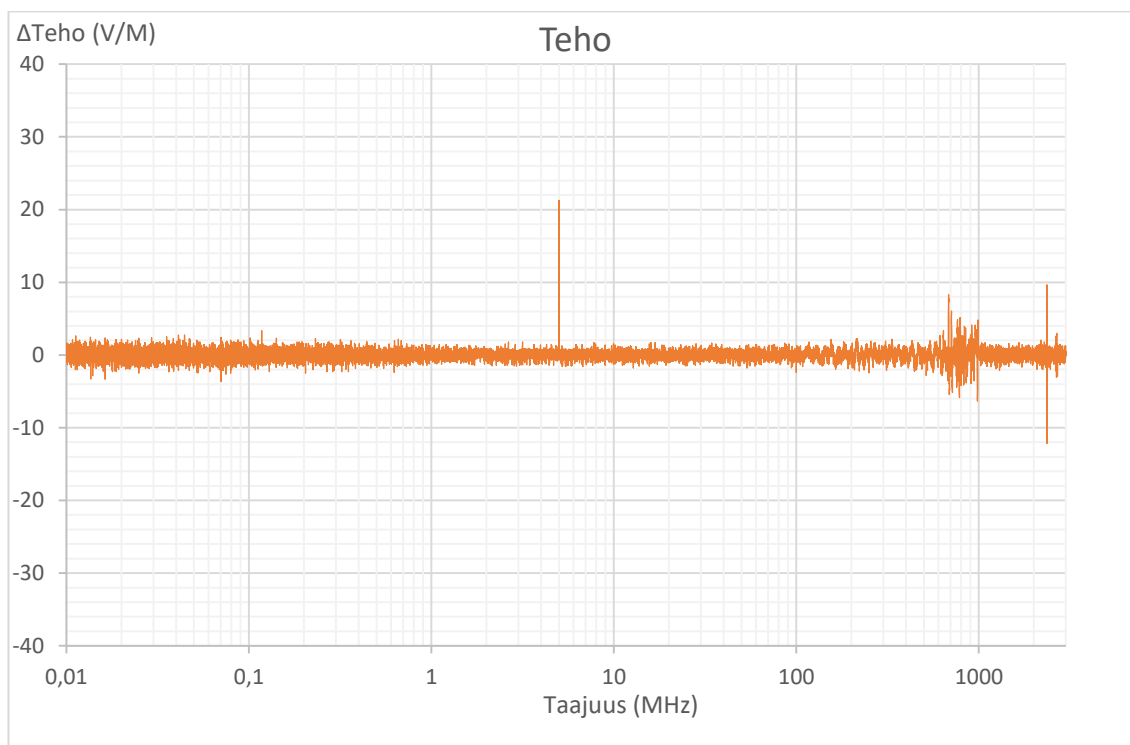
Testattava tuote 1 immunitaettimittaukset 0° TEM vs. 90° TEM

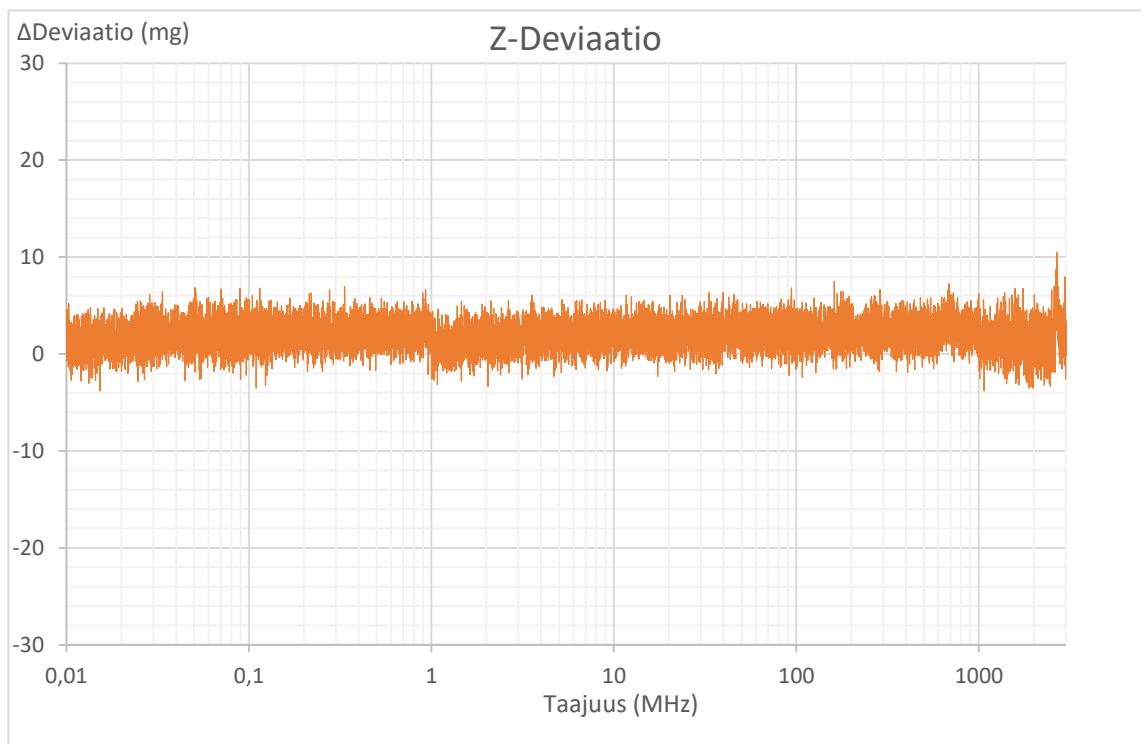
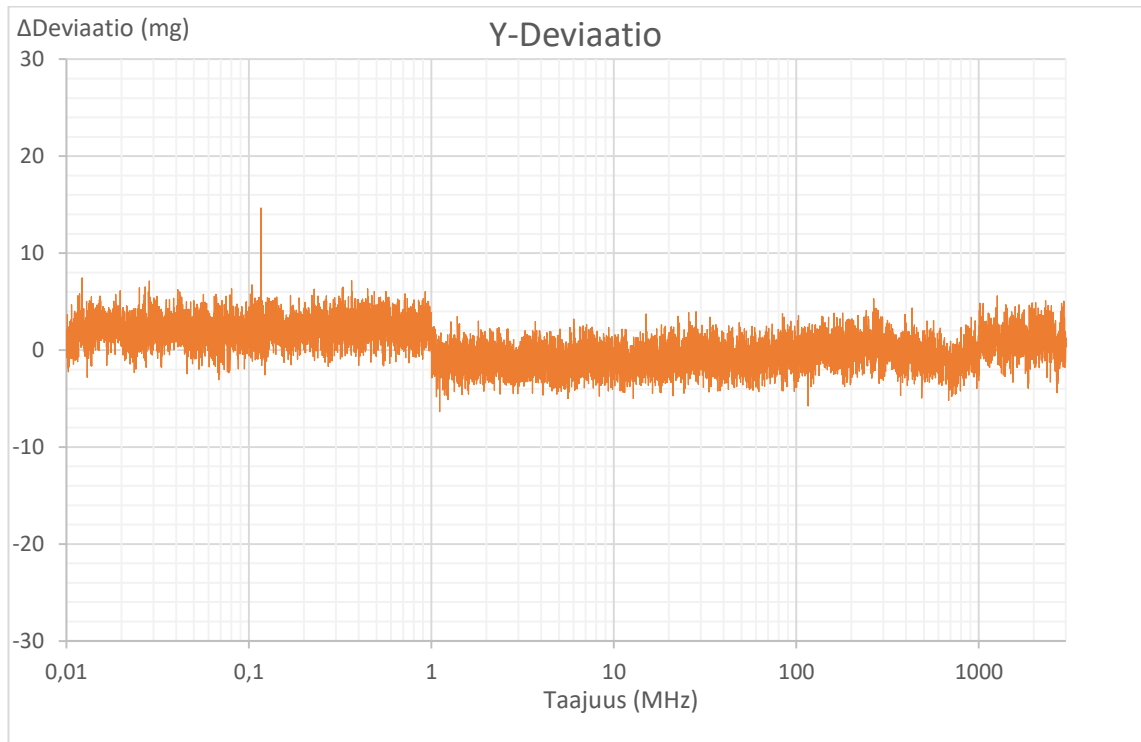


Testattava tuote 1 immunitaettimittaustulokset 0° IC Stripline vs. 180° IC Stripline

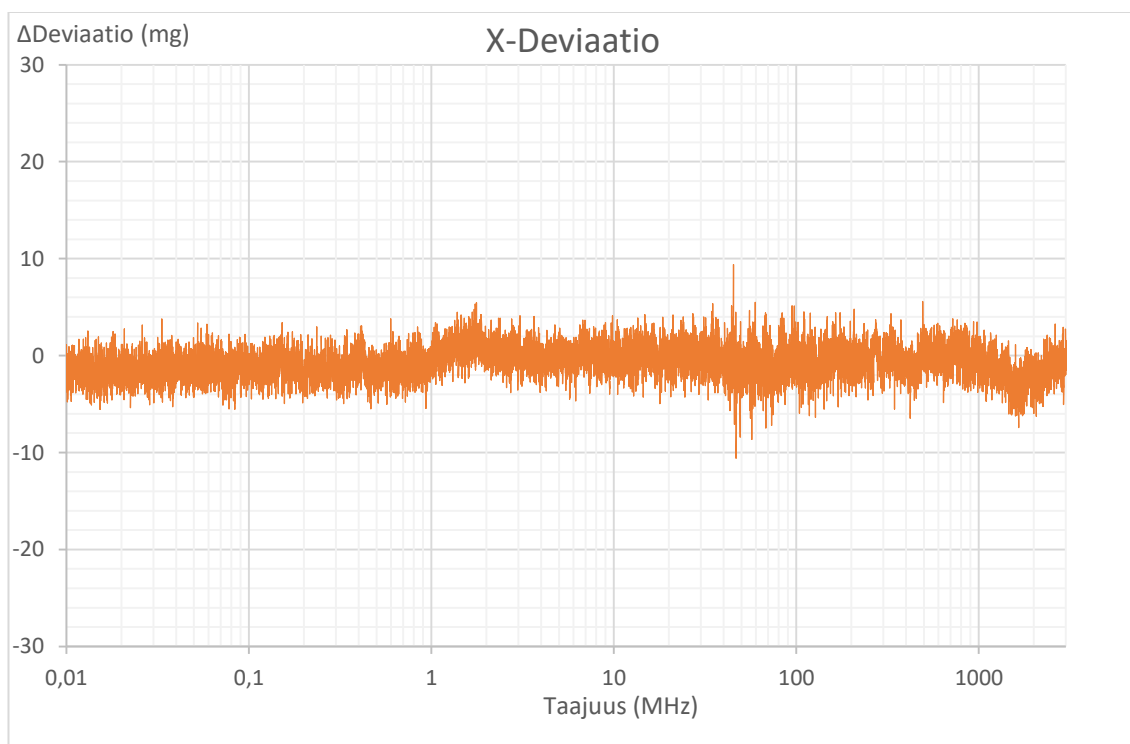
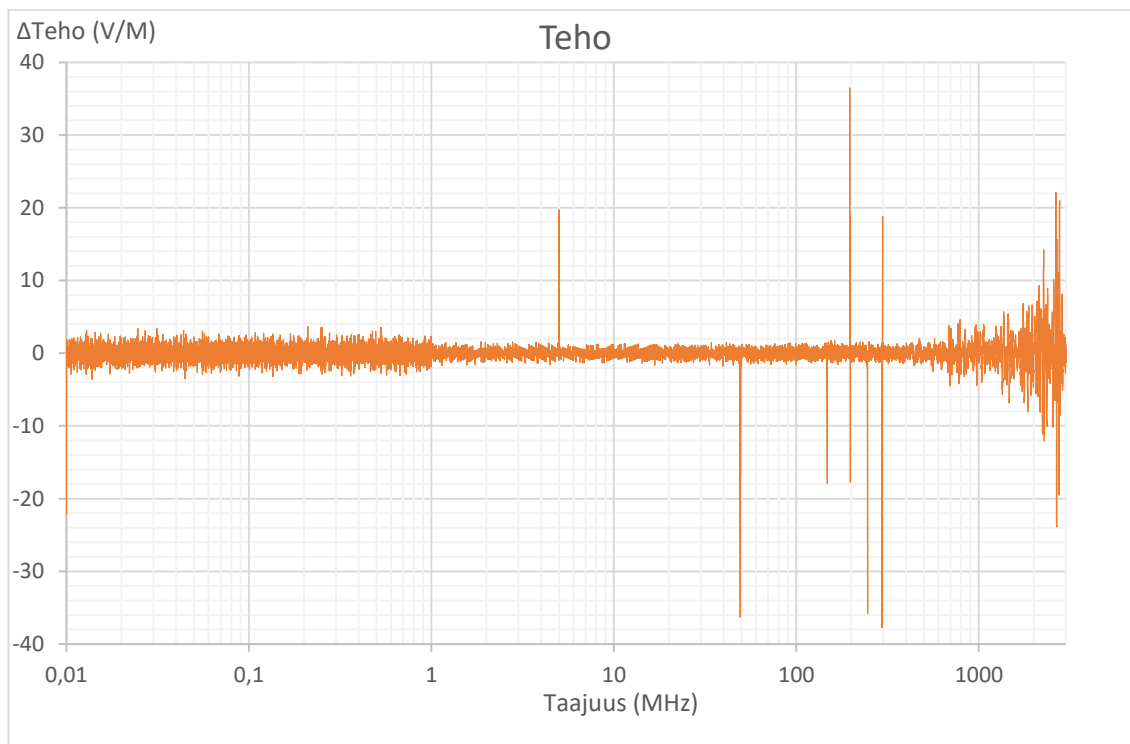


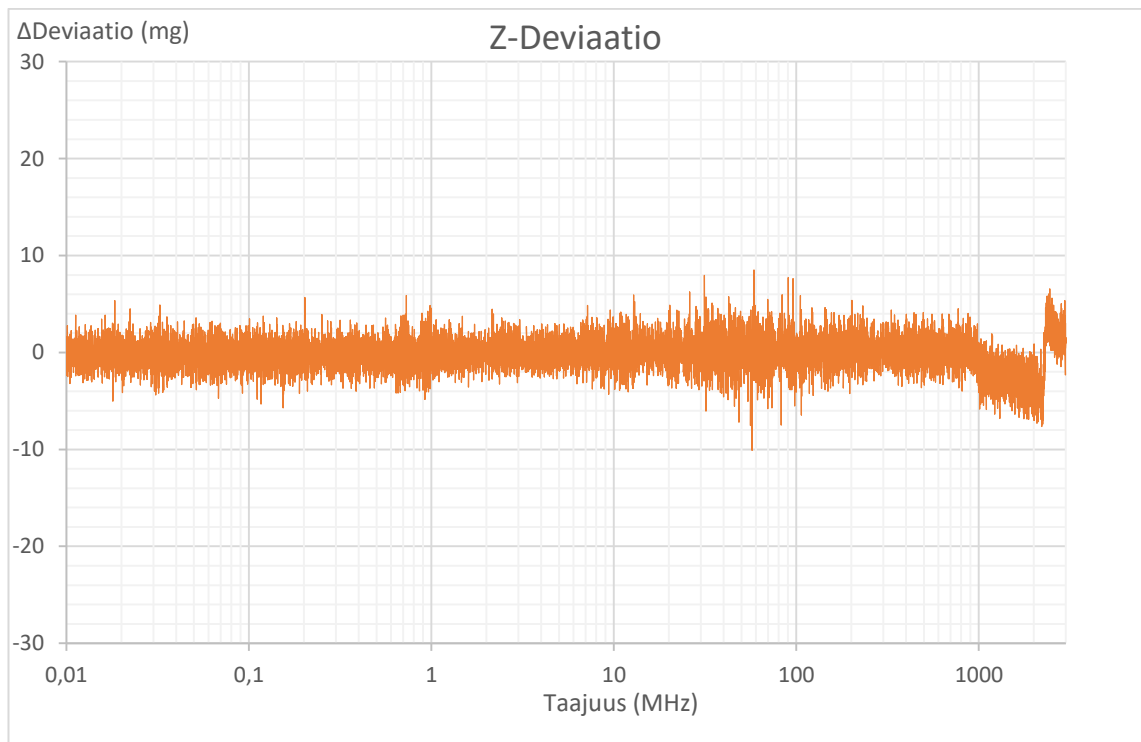
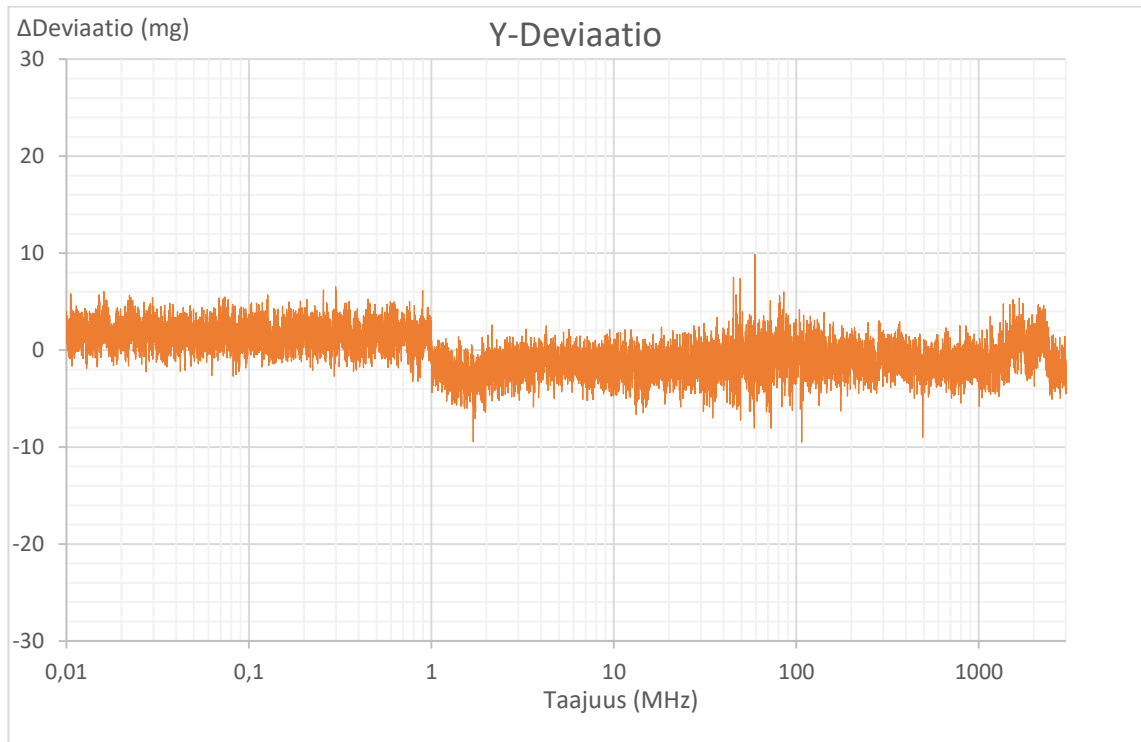


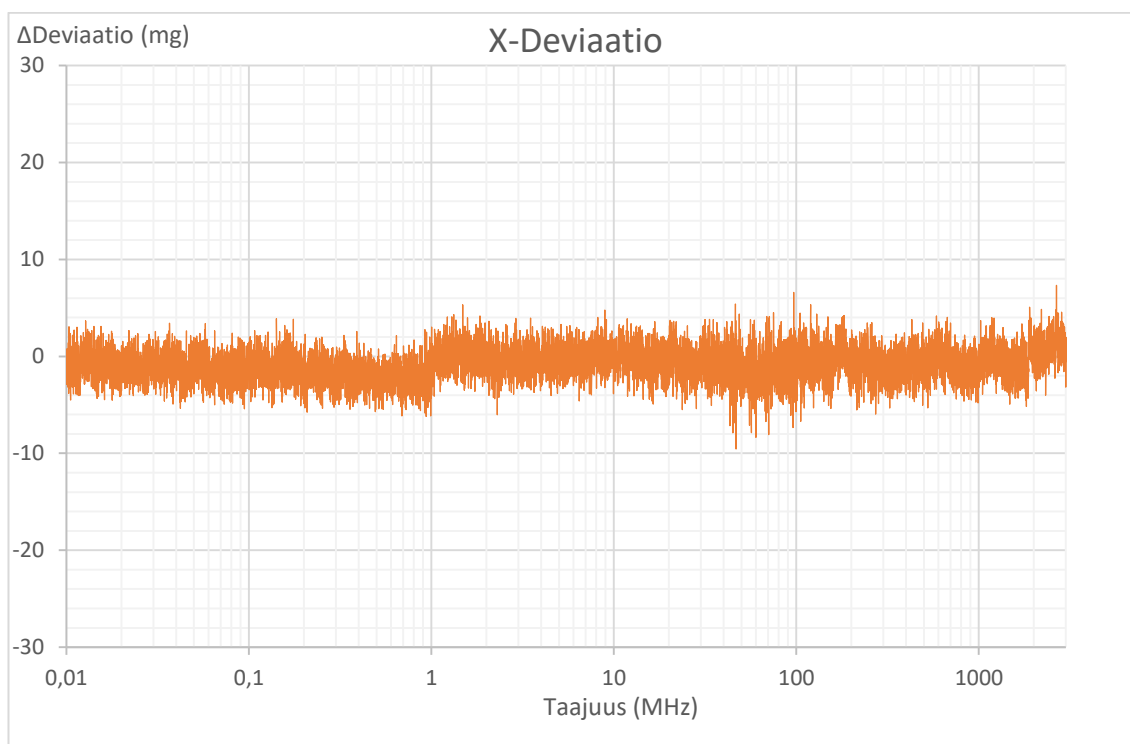
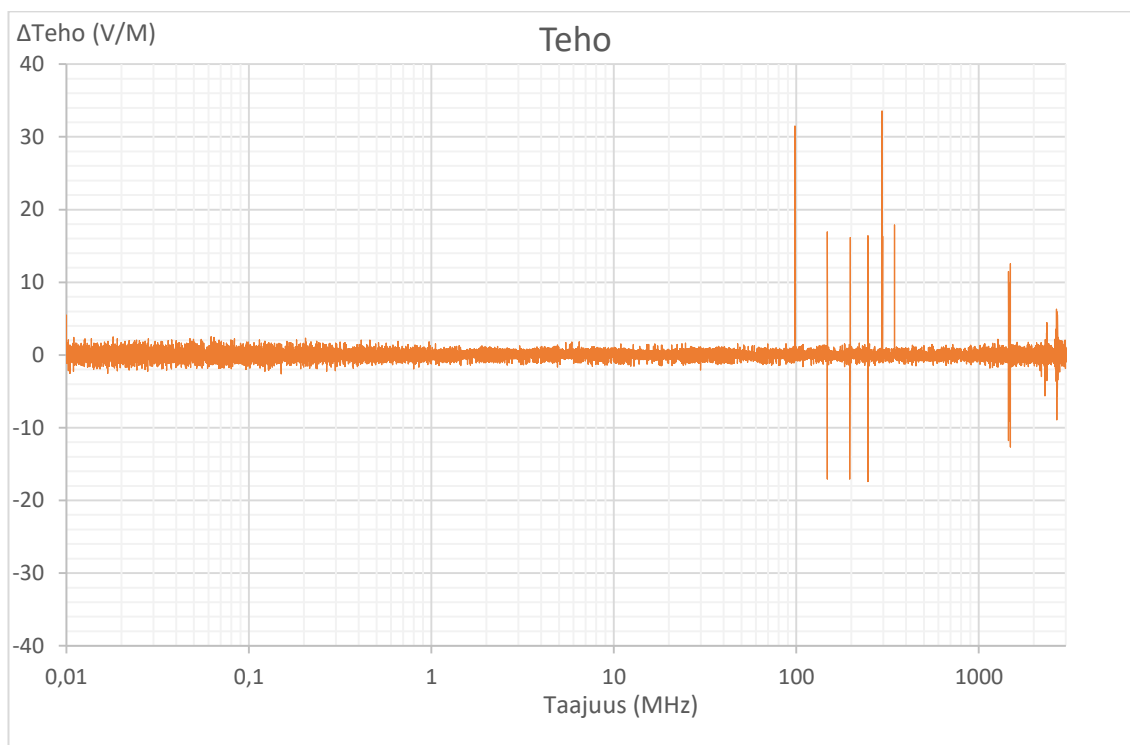
Testattava tuote 1 immunitaettimittaukset 0° TEM vs. 180° TEM

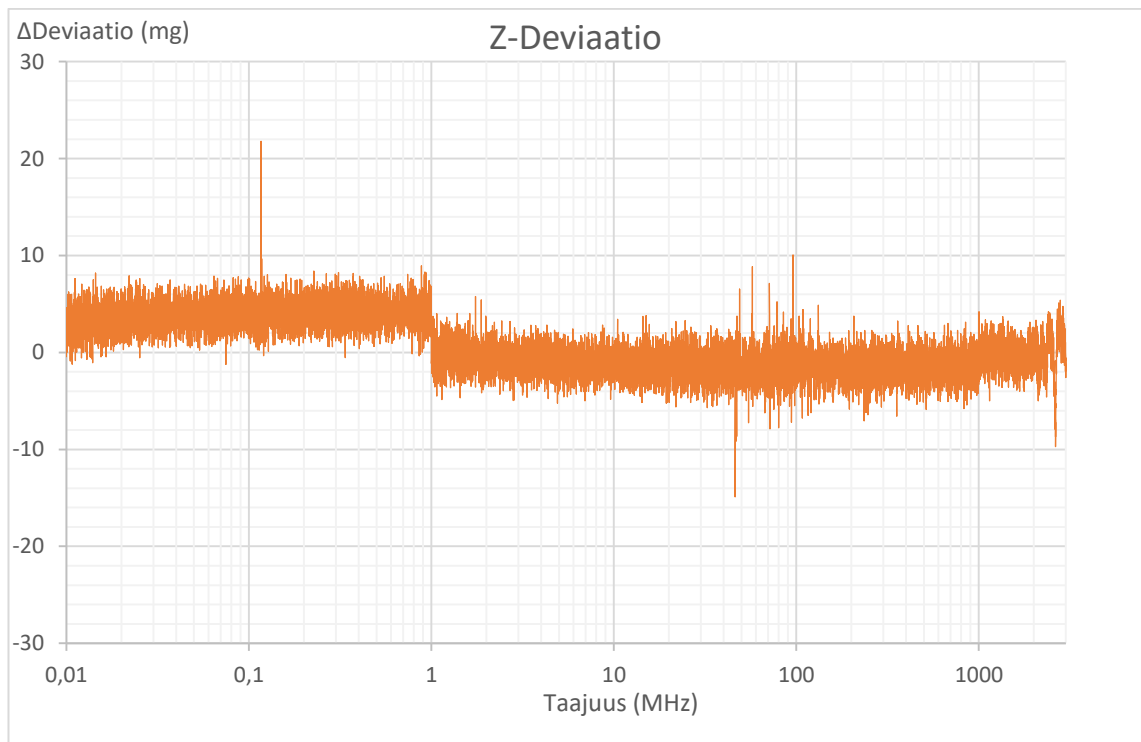
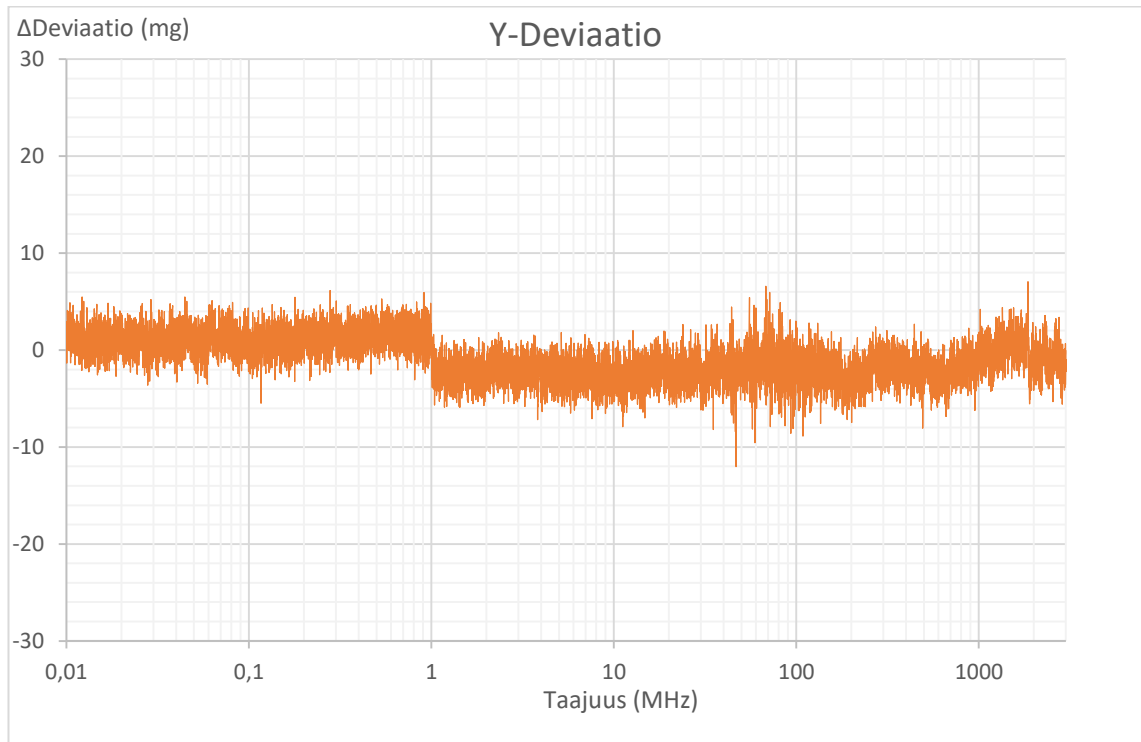


Testattava tuote 1 immunitaettimittaustulokset 90° IC Stripline vs. 270° IC Stripline

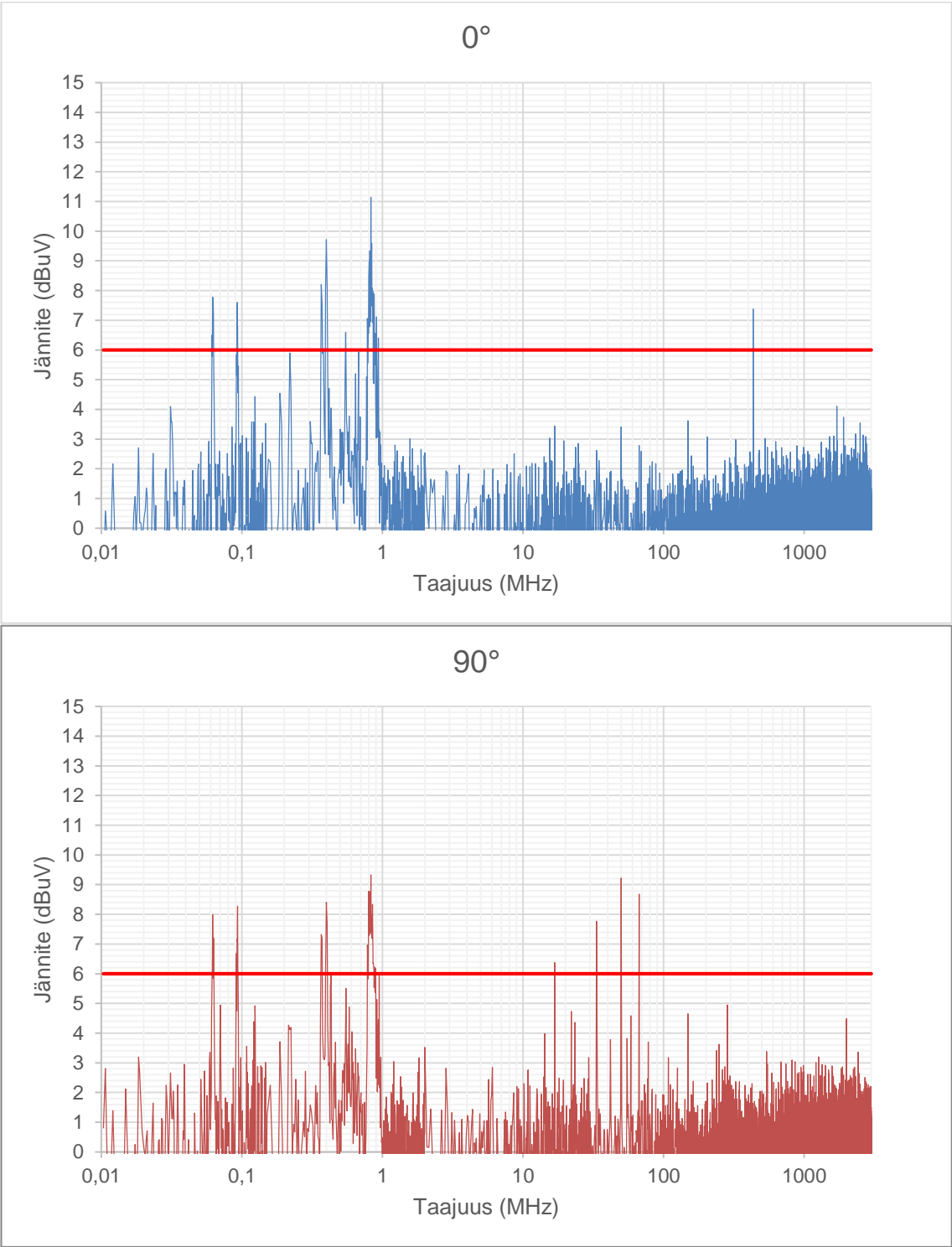


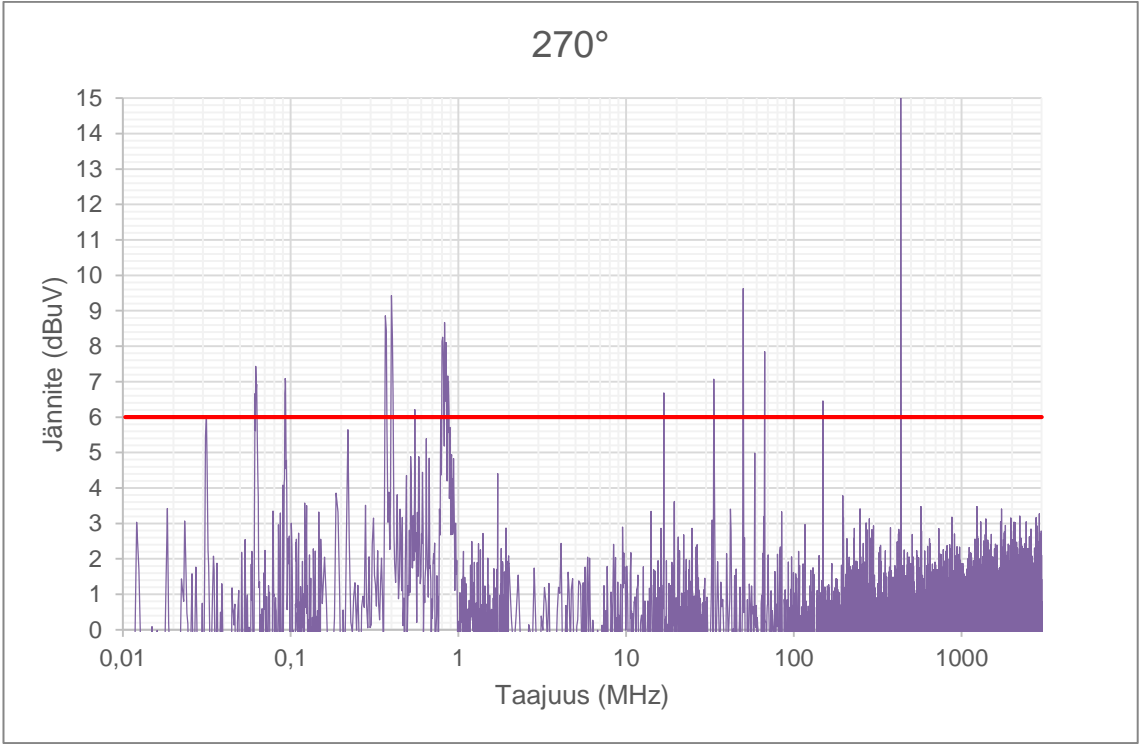
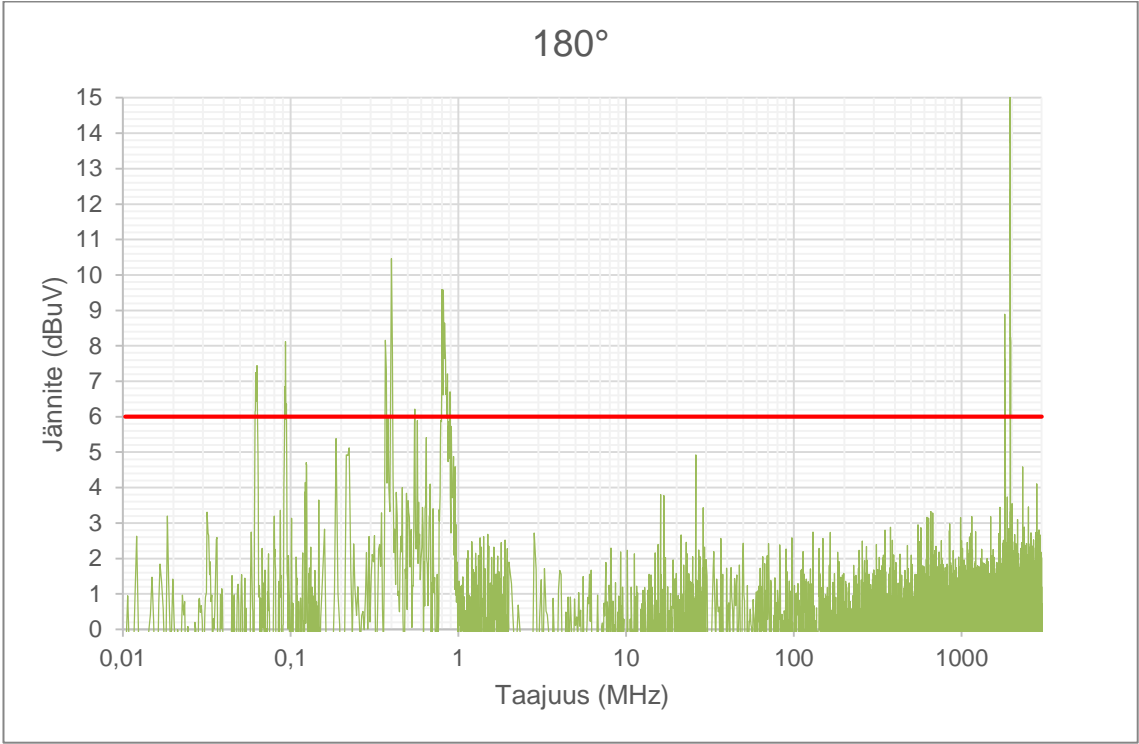


Testattava tuote 1 immunitaettimittaukset 90° TEM vs. 270° TEM



Testattava tuote 2 emissiomittaustulokset TEM





Testattava tuote 2 emissiomittaustulokset IC Stripline

